



PROYECTO FIN DE CARRERA

Proyecto básico de una planta de biomasa de Eucalipto Globulus en España

Memoria de proyecto para la obtención del título de Ingeniería Industrial.

Especialidad: Tecnologías Energéticas.

Presenta:

Juan Antonio Pozas Ortiz

Tutor del proyecto:

Javier Villa Briongos

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

Universidad Carlos III de Madrid

Madrid (España), a 27 de Septiembre del 2012



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Agradecimientos

Dedico este proyecto a aquellos que siempre confiaron en mí.

Gracias en primer lugar a mi familia y a mi novia por su confianza ciega en mí. Siempre me han apoyado para finalizar la carrera y este proyecto cuando todo estaba cuesta arriba.


Gracias a todos mis compañeros que me han ido acompañando en esta etapa de mi vida en la universidad, me llevo recuerdos difíciles de borrar.

Finalmente agradezco especialmente a Javier Villa Briongos, tutor de este proyecto, por su tiempo y por su dedicación en este proyecto.



Índice General


BLOQUE I: INTRODUCCIÓN	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA	12
2.1. ¿Qué es la biomasa?	12
2.2. ¿Por qué la biomasa?	12
2.3. ¿Qué tipo de biomasa emplear en la planta?	13
3. SITUACIÓN ACTUAL	17
3.1. Uso de la energía renovable en España	17
3.2. Escenario energético en el horizonte 2020	20
3.3. Análisis de la biomasa actual	22
3.4. Balance socioeconómico	22
3.5. Creación de riqueza	24
3.6. Creación de empleo	25
3.7. Balance de emisiones de CO ₂	26
4. VENTAJAS DE LA BIOMASA	29
5. OBEJETIVOS	30
5.1. Objetivo general	30
5.2. Objetivo parcial	30
BLOQUE II: DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.	31
1. LOCALIZACIÓN	32
1.1. Estudio preliminar	32
1.2. Situación exacta de la planta	35
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	44
2.1. Introducción	44
2.2. Diagrama de los distintos sistemas.	45
2.3. Equipos de los distintos sistemas	45
2.3.1. Sistema de tratamiento de biomasa.	45
2.3.2. Sistema de tratamiento de aguas	48
2.3.3. Sistema de refrigeración	52
2.4. Ciclo de agua/vapor (Ciclo Rankine)	53

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz


2.4.1.	Descripción del ciclo / Análisis del ciclo	53
2.4.1.1.	Método.....	54
2.4.1.2.	Hipótesis de cálculo.....	54
2.4.1.3.	Combustible	55
2.4.1.4.	Bases de diseño	56
2.4.1.5.	Cálculos	58
2.4.1.6.	Rendimientos	76
2.4.1.7.	Resultados	78
2.4.2.	Discusión de resultados.....	84
2.4.3.	Posibles mejoras del ciclo.....	87
2.4.3.1.	Reducción de la presión del condensador.	88
2.4.3.2.	Aumento de la presión de la caldera	88
2.4.3.3.	Aumento de la temperatura en la entrada de la turbina de vapor	88
2.4.3.4.	Recalentamiento en la segunda etapa de la turbina	88
2.4.3.5.	Realización de un mayor número de extracciones	88
2.4.3.6.	Reducción de pérdidas de agua en la torre de refrigeración y reducción de los penachos.....	89
2.4.3.7.	Hibridación con gas natural.....	89
2.4.3.8.	Sustitución de la caldera sub-crítica por una caldera súper-crítica.	89
2.4.3.9.	Reducción de título a la salida en la turbina de vapor	90
2.4.3.10.	Optimización de la temperatura en la extracción.....	90
	BLOQUE III: ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES CALDERA Y TECNOLOGÍAS DE COMBUSTIÓN	92
1.	OBJETO	93
2.	TECNOLOGÍAS ESTUDIADAS	94
2.1.	Clasificación según el sistema de combustión	94
2.1.1.	Gasificación y Cámara Torsional.....	94
2.1.1.1.	Gasificador	95
2.1.1.2.	Cámara torsional	96
2.1.2.	Sistema de parrillas	97
2.1.2.1.	Hogar reactor	97
2.1.3.	Lecho fluido	98
2.2.	Ventajas y desventajas de las tecnologías estudiadas	99



2.2.1.	Gasificación + Cámara de torsión.....	99
2.2.1.1.	Ventajas.....	99
2.2.1.2.	Desventajas	100
2.2.2.	Sistema de parrillas	100
2.2.2.1.	Ventajas.....	100
2.2.2.2.	Desventajas	100
2.2.3.	Lecho fluidizado.....	100
2.2.3.1.	Ventajas.....	100
2.2.3.2.	Desventajas	101
2.3.	Conclusión de la tecnología empleada.....	101
3.	TIPOS DE CALDERAS	103
3.1.	Conclusión del tipo de caldera empleada	104
4.	CARACTERÍSTICAS CALDERA DE VAPOR	105
4.1.	Clasificación, Almacenamiento y Alimentación de combustible	105
4.2.	Sistema de combustión/ Hogar	105
4.3.	Sistema agua alimentación	105
4.4.	Economizador.....	106
4.5.	Calderín de vapor	106
4.6.	Sobrecalentadores	107
4.7.	Sistema de aire de combustión	107
4.7.1.	Ventilador aire forzado primario.....	108
4.7.2.	Ventilador aire forzado secundario.....	108
4.8.	Sistema de gases de combustión	108
4.8.1.	Ventilador de tiro inducido	108
4.8.2.	Conductos de gases.....	108
4.8.3.	Sistema depuración de humos.....	109
4.8.4.	Multiciclones	109
4.8.5.	Filtro de mangas/ Precipitador electrostático	109
4.8.6.	Chimenea.....	110
4.9.	Tratamiento de cenizas	110
BLOQUE IV: IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....		111
1.	OBJETIVO	112

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

2.	MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA.....	113
2.1.	Atmósfera.....	113
2.2.	Ciclo de los contaminantes atmosféricos.....	114
2.3.	Dispersión de contaminantes en el aire.....	114
2.3.1.	Efecto del viento.....	116
2.3.2.	Estabilidad atmosférica	116
2.3.3.	Topografía	117
2.3.4.	Altura de mezcla atmosférica.....	118
2.3.5.	Inversión	118
2.3.6.	Movimiento de los penachos	119
2.3.7.	Efecto Downwash.....	120
2.3.8.	Resumen de los aspectos que afectan a la dispersión	121
3.	MODELO ISC3	122
3.1.	Introducción	122
3.2.	Descripción.....	122
3.3.	Ecuación general	123
3.3.1.	Metodología	125
3.3.2.	Velocidad del viento.....	126
3.3.3.	Dispersión lateral y vertical de la columna de gases.....	127
3.3.4.	Altura efectiva	128
3.3.5.	Término de distribución vertical del contaminante	129
3.3.6.	Término de agotamiento o eliminación del contaminante por reacción química u otros procesos físicos	130
4.	EMISIONES DE CONTAMINANTES EN LA PLANTA DE BIOMASA	131
5.	VALORES LÍMITE PERMITIDOS PARA LA PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE	132
5.1.	Valores límite de SO ₂	132
5.2.	Umbral de alerta del SO ₂	133
5.3.	Valores límite de NO _x	133
5.4.	Umbral de alerta del NO _x	133
6.	NIVELES DE CONTAMINACIÓN ACTUALES.....	134
6.1.	Santiago de Compostela.....	134
6.2.	A Coruña.....	135

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

6.3.	Valor de referencia.....	137
7.	RESULTADOS	138
7.1.	Impacto medioambiental en Val do Dubra	138
7.2.	Impacto medioambiental en Santa Comba.....	142
7.3.	Impacto medioambiental en Coristanco	144
7.4.	Impacto medioambiental en Tordoia.....	147
	BLOQUE V: ESTUDIO ECONÓMICO.....	151
1.	OBRA CIVIL	152
1.1.	Movimiento de tierras.....	152
1.2.	Edificación	152
1.3.	Bancadas principales	152
1.4.	Urbanización.....	152
2.	INGENIERÍA.....	153
3.	EQUIPOS	154
3.1.	Sistema de tratamiento de biomasa	154
3.2.	Sistema de refrigeración	154
3.3.	Sistema de aguas.....	154
3.4.	Ciclo Rankine	154
4.	RESUMEN ECONÓMICO	155
	BLOQUE VI: CONCLUSIÓN	156
	ANEXOS	158
1.	DETALLE DE LOS CÁLCULOS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	159
1.1.	Velocidad:.....	159
1.2.	Dispersión lateral y vertical de la columna de gases.....	159
1.3.	Altura efectiva	162
1.4.	Término de distribución vertical del contaminante	164
1.5.	Término de agotamiento o eliminación del contaminante por reacción química u otros procesos físicos	165
1.6.	Resolución del modelo ISC3	166
2.	LISTA DE TABLAS.....	167
3.	LISTA DE FIGURAS.....	170
4.	RERFERENCIAS.....	173



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

BLOQUE I: INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía es una de las principales preocupaciones de la sociedad actual, debido fundamentalmente al constante aumento de los precios del petróleo y sus derivados, que parecen no tener límite y a los efectos nocivos provocados por el uso masivo de los combustibles fósiles.

Actualmente, más del 77,6 % de nuestro abastecimiento energético proviene de energías fósiles, otro 11,7 % de energía nuclear, y solamente alrededor del 11,1 % de Energías Renovables. Este 89,3 % no renovable conlleva importantes implicaciones medioambientales y una fuerte dependencia del abastecimiento exterior.

Fuente de energía	Consumo % 2010
Energías Fósiles	77,6
Energía Nuclear	11,7
Energía Renovable	11,4

Tabla 1: Consumo de las de las tres principales fuentes de energía 2010

A continuación se muestra los porcentajes de consumo energéticos nacional en los años 2009 y 2010 de las diferentes fuentes de energía, tanto renovable como no renovable.

Fuente de energía	Consumo % 2009	Consumo % 2010
Petróleo	48,8	47,4
Gas Natural	23,8	23,8
Nuclear	10,5	11,7
Carbón	7,9	6,4
Biomasa	3,9	4
Eólica	2,4	2,8
Hidráulica	1,7	2,7
Biocarburantes	0,8	1,2
Solar	0,6	0,7

Tabla 2: Consumo desglosado de las diferentes energías entre 2009 y 2010



Cada año, el consumo de estas energías va en aumento, por lo que nuestra dependencia energética hacia fuentes extranjeras crece de igual forma, para mantener cubiertas estas necesidades, al no tener recursos necesarios para generarlas en España.

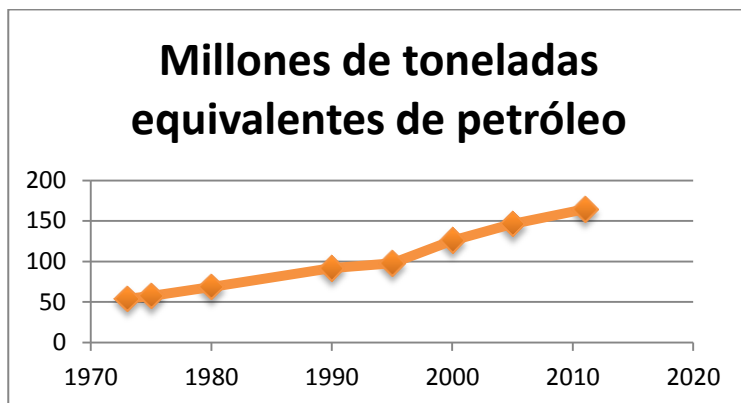


Figura 1: Millones de toneladas equivalentes de petróleo[1]

Por estos motivos debemos buscar nuevas fuentes de energía o abandonar el uso de fuentes de energía que no se encuentren en España, para poder llegar a un futuro sin la necesidad de importar energía fósiles del extranjero.

Actualmente tenemos una dependencia de energía externa superior a la media de la Unión Europea 48% frente al 73,9% en España. En la siguiente tabla podemos observar el nivel de autoabastecimiento de energía primaria en España. (Relación entre producción interior y consumo total de energía)

Año	Grado de autoabastecimiento energético (%)
1975	22,6
1985	38,9
1995	28
1998	25,6
2003	22,1
2008	21,6
2009	22,9
2010	26,1

Tabla 3: Grado de autoabastecimiento energético



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Para conseguir el autoabastecimiento energético es necesario fomentar el uso de energías renovables o no renovables obtenidas en España, como pueden ser:

- Biomasa
- Eólica
- Solar
- Hidráulica
- Carbón
- Etc.

En este proyecto fin de carrera se elegirá la opción de usar la biomasa como combustible para la obtención de energía, porque es un combustible muy abundante en España.



2. BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA

2.1. ¿Qué es la biomasa?

Según la RAE: *"Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía"*.

Según AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación): "Todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización".

La segunda descripción es más acertada ya que excluye de ella al carbón, petróleo y al gas, por no cumplir el balance neutro de la biomasa sobre el CO₂.

2.2. ¿Por qué la biomasa?

El actual modelo energético es insostenible pues, aparte del efecto invernadero, contaminación y cambio climático, existe un factor limitante: la dependencia de un recurso "no renovable" cada vez más escaso.

La biomasa es un tipo de energía renovable, que a corto plazo, puede ser básica en nuestra sociedad, tanto desde el punto de vista energético y ambiental, como para el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales, debido a que podrá dar trabajo en las zonas rurales evitando la migración de la población de pueblos a las grandes ciudades, mediante la conservación de bosques o cultivos energéticos para la obtención de biomasa como combustible.

La biomasa tiene un balance neutro de CO₂, es decir, no contribuye al aumento del efecto invernadero, porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual (Es el que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, precisamente como el carbón, gas o el petróleo.

Además, en caso de cumplirse finalmente la serie de objetivos que se han planteado en el marco del Plan de Energías Renovables 2011-2020, un estudio elaborado por Boston Consulting Group y difundido por la firma Ence, sostiene que, en el caso particular de la biomasa, se estarán generando ingresos por una cifra cercana a los 725 millones de euros.

Finalmente, y más allá de estos beneficios cuantificables, hay otros como la generación de 15.000 empleos en el entorno rural, o la inversión industrial forestal de más de 3.000 millones de euros.



2.3. ¿Qué tipo de biomasa emplear en la planta?

La biomasa propuesta es Eucalipto Globulus, especie abundante en España, siendo el octavo país del mundo en cuanto a plantaciones de Eucalipto. De este modo, la explotación de este recurso natural nos aseguraría el total abastecimiento de combustible de la planta, tal y como avala el Estudio Técnico del PER 2011-2020: (*Evaluación del Potencial de la Energía de la Biomasa*) al denominar este aprovechamiento como “Una clara opción para producción bioenergética”.

País	Cantidad de Eucalipto (ha)
India	3.942.600
Brasil	3.751.857
China	2.609.700
Australia	875.000
Uruguay	676.024
Chile	652.100
Portugal	647.000
España	640.000

Tabla 4: Cantidad de Eucalipto (ha) [18]



Y entre España y Portugal tienen más del 50 % de Eucalipto Globulus.

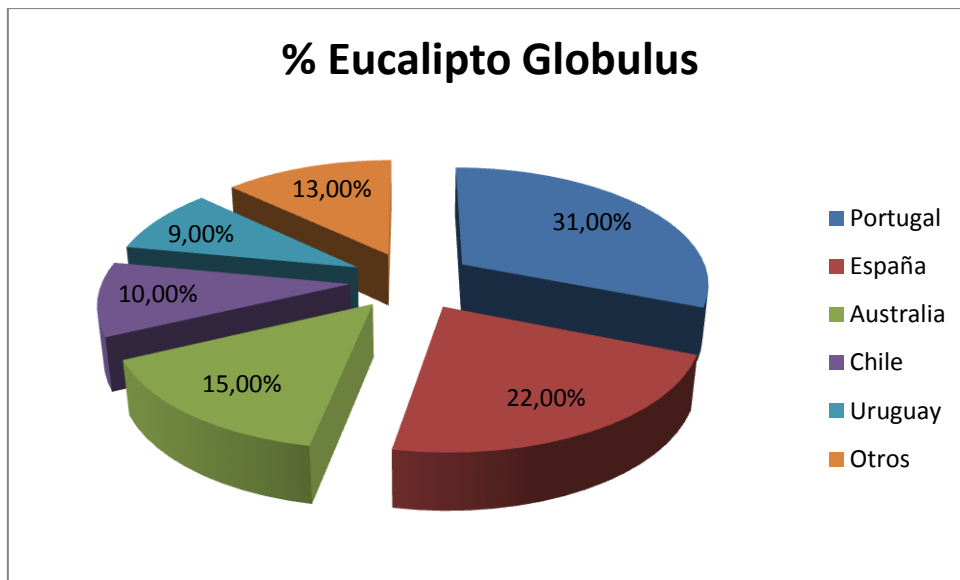


Figura 2: Porcentaje de Eucalipto Globulus en el mundo[18]


Los principales aspectos para la utilización del Eucalipto Globulus con fines energéticos en la planta de biomasa son:

- Abastecimiento asegurado.
- Alta tolerancia climática.
- Mayor fijación de CO₂
- Bajo consumo de agua y nutrientes frente a especies de crecimiento rápido.
- Alta velocidad de crecimiento, incluso después de ser cortado.
- Alto rendimiento forestal

Como se ha mencionado anteriormente, el abastecimiento de eucalipto en España está asegurado, de todas formas más adelante se presentará un estudio más exhaustivo en la elección de la ubicación de la planta para asegurar este suministro.

El eucalipto es originario de Australia, pero tiene una gran adaptación al medio. Es en la zona norte peninsular donde las condiciones de clima y suelo son especialmente idóneas para su desarrollo natural productivo.

El eucalipto tiene una mayor fijación de CO₂ que otras especies como el pino, el castaño o la encina.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Fijación de CO ₂	
Eucalipto	0,1359 Tn CO ₂ / año/ pie
Pino	0,0291 Tn CO ₂ / año/ pie
Castaño	0,0681 Tn CO ₂ / año/ pie
Encina	0,0254 Tn CO ₂ / año/ pie

Tabla 5: Fijación de CO₂[24]

El eucalipto tiene una velocidad de crecimiento rápido. Cualquier especie de rápido crecimiento y alta productividad, ya sea agrícola o forestal, necesita más agua que otras de crecimiento lento o reducido. Con todo, el eucalipto no es un árbol que destaque por su elevado consumo de agua; al contrario, su balance es mejor que el de las coníferas y bastante mejor que el de cualquier cultivo agrícola. En cambio, es una de las especies más eficientes en el consumo de agua para la producción de biomasa.

Consumo de agua [Litro/kg de material seco]					
Eucalipto	Roble	Pinos	Maíz	Batata	Soja
306	400	303	1.000	2.000	2.000

Tabla 6: Consumo de agua[24]

Al ser una especie de alto crecimiento es posible cortarlos con mayor frecuencia incrementando así su rendimiento.

	Rendimiento Forestal					
	Eucalipto	Abedul	Pino	Picea	Haya	Acacia
m3/ha/año	15-30	3-8	2-10	4-10	2-9	15-25
Turnos (años) de corta	9-14	25-45	75-110	60-80	100-140	6-12

Tabla 7: Rendimiento Forestal[24]



Resumen de las características del eucalipto.

Características	
Altura	70 m
Diámetro	2 m
Fijación de CO ₂	0,1359 Tn CO ₂ /año/ha
Consumo de agua	306 l /kg de madera seca
m ³ /ha/año	15-30
Turnos (años) de corta	9-14
Velocidad	Crecimiento rápido
PCI	2.165 kcal/kg
Emisiones NOx	0,0118 g/kg
Emisiones SOx	0,000655 g/kg

Tabla 8: Características Eucalipto Globulus



3. SITUACIÓN ACTUAL

La situación actual de España ha cambiado respecto hace unos años debido a la crisis y al nuevo PER (Plan de Energías Renovables) que sustituye al PER 2005-2010 para implantar el nuevo PER 2011-2020. Este nuevo escenario energético establece como objetivo conseguir una cuota mínima del 20 % de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Unión Europea, el mismo objetivo establecido para España, y una cuota mínima del 10 % de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía en el sector del transporte en cada estado miembro para el año 2020.

3.1. Uso de la energía renovable en España

Las sociedades industriales necesitan cada vez mayor cantidad de energía destinadas a abastecer las necesidades de energía primaria, generación de electricidad y transporte.

Consumo de energía primaria

A continuación podemos ver el consumo de energías primarias en España en 2010.

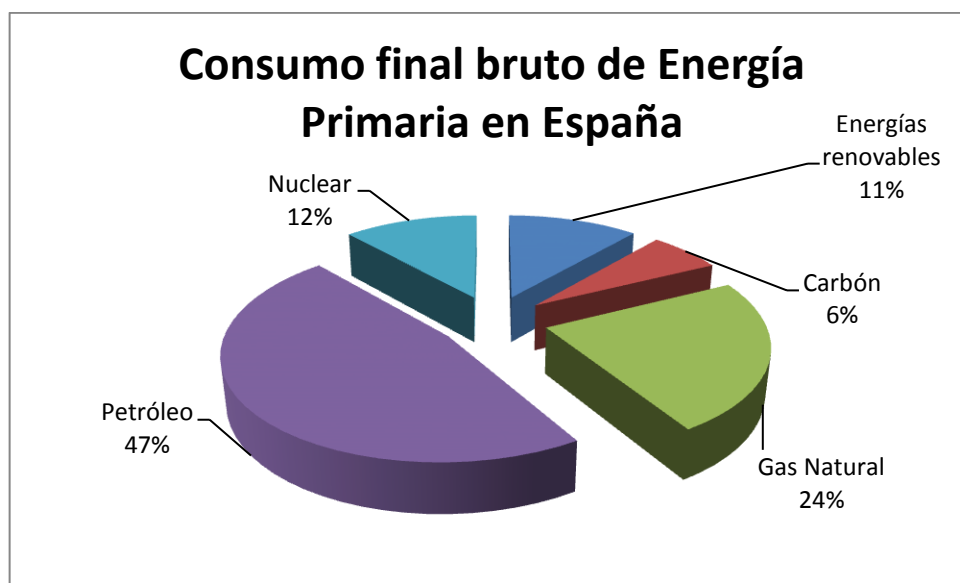


Figura 3: Consumo final bruto de energía primaria en España[1]

Y el uso de energías renovables para alcanzar el 11.4 % de consumo de energía primaria está repartido de la siguiente manera:



Consumo de Energía Primaria en España (Energías Renovables)

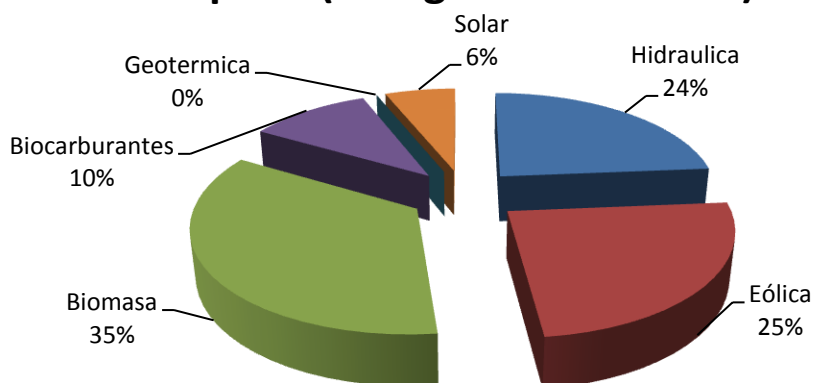


Figura 4: Consumo de energía primaria en España (Energías Renovables)[1]

La biomasa es la energía con mayor representación en el consumo de energía primaria, seguida de la eólica e hidráulica.

Generación de electricidad

A continuación podemos ver las distintas energías empleadas para la producción de electricidad según su porcentaje en España en 2010.

Producción Eléctrica

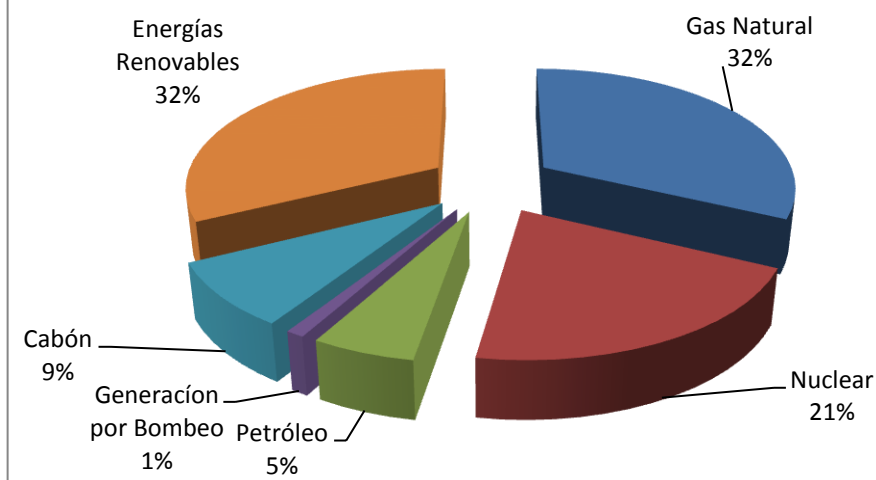


Figura 5: Producción Eléctrica[1]



Y el uso de energías renovables para generar electricidad esta entorno al 32,3 %, es el más alto de todas las energías primarias, seguido de un 32 % del Gas Natural.

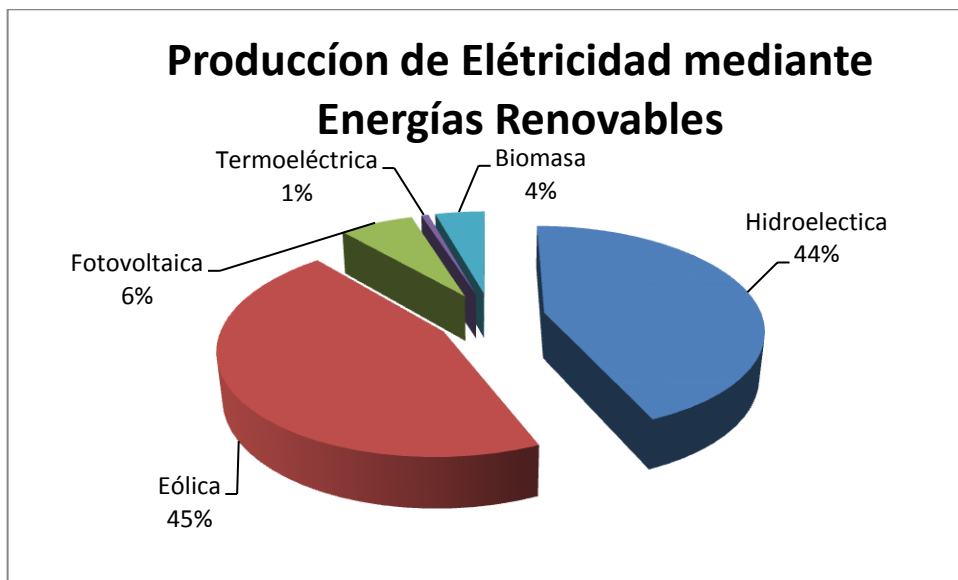


Figura 6: Producción Eléctrica mediante energías renovables[1]

De las energías renovables las más empleadas para la generación de electricidad es la eólica y la hidráulica, entre las dos abarcan casi el 90% de la electricidad producida mediante energías renovables.

Transporte

Uno de los principales sectores es el del transporte, debido a su gran consumo de energía, para usos energéticos y no energéticos, que ronda el 40 % del total de la energía final consumida.

El consumo de energía para transporte, es principalmente el petróleo con un 97,92 %, el resto del consumo para el transporte proviene de la electricidad y de los biocombustibles con un 1.15 % y 0.93 % respectivamente, estos datos han sido recogidos en el informe de IDAE del 2007, aunque no son datos actuales podemos observar la gran diferencia entre el uso del petróleo como energía para el transporte y el resto de energías.

En la actualidad el consumo de energías renovables para el sector del transporte ronda el 5%.



3.2. Escenario energético en el horizonte 2020

Al plantear un escenario, debemos observar los parámetros que influyen en él y tener en cuenta dos escenarios, uno optimista y otro pesimista.

Los principales parámetros son:

- Evolución social
- Evolución de los precios del petróleo
- Evolución de los precios del gas natural
- Eficacia energética

Referente a la población

Se ha estimado que la población experimentará un crecimiento del 1,3 millones de habitantes entre 2010 y 2020 para superar ligeramente los 48 millones al final del periodo.

Referente a los precios del petróleo.

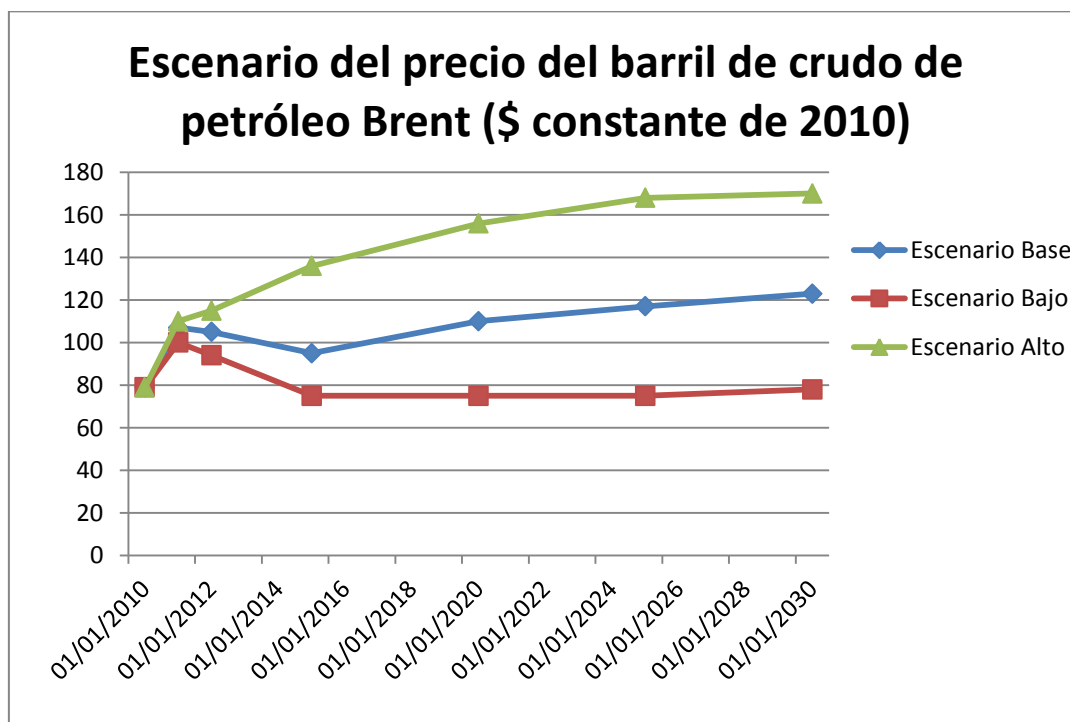


Figura 7: Escenario del precio del barril de crudo de petróleo Brent[9]



Referente a los precios del gas natural.

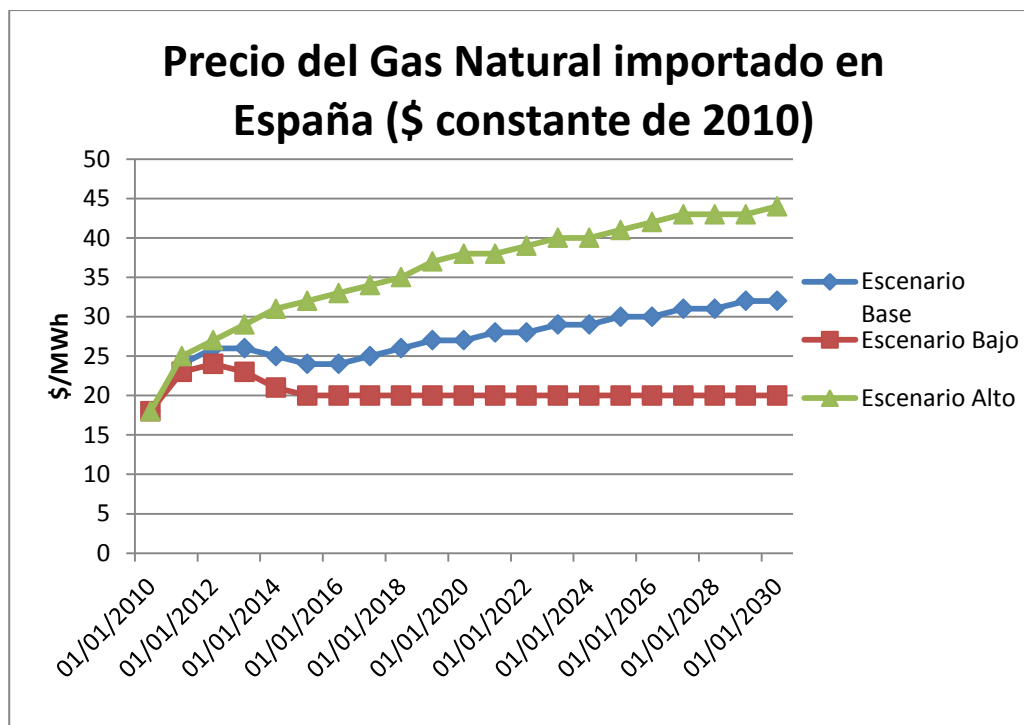


Figura 8: Escenario del precio del Gas Natural importado en España[9]

Eficacia energética

El PER 2011-2020 incorpora un importante paquete de nuevas medidas de eficiencia energética al horizonte del 2020, que permitirá reducir la demanda de energía primaria desde los 166 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep) que se esperaban en 2020 con el escenario de referencia, a algo más de 142 millones de tep con el nuevo escenario. [Escenario Eficiencia energética adicional, PER]

Los dos escenarios solo se diferencian en las medidas de ahorro y eficiencia energética consideradas. Mientras el escenario de referencia únicamente tiene en cuenta las actuaciones de eficiencia energética llevadas a cabo hasta el año 2010, el escenario de eficiencia energética adicional, contempla las mejoras derivadas del Plan de de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020.



Consumo de energía primaria en el escenario de eficiencia energética adicional.

ktep	2015	%	2020	%
Carbón	10.548	7,6	10.058	7,0
Petróleo	56.606	40,8	51.980	36,2
Gas Natural	36.660	26,4	39.237	27,3
Nuclear	14.490	10,4	14.490	10,1
Energías Renovables	20.593	14,8	27.878	19,4

Tabla 9: Consumo de energía primaria en el escenario de eficiencia energética adicional[1]

Con este escenario podemos destacar que estaremos próximos a cumplir con la cuota mínima del 20 % de energía renovable en el consumo de energía primaria, y habremos reducido la dependencia de las energías fósiles desde el 77,6 % a un 63,5 %, gracias al crecimiento de las energías renovables.

3.3. Análisis de la biomasa actual


El potencial de biomasa disponible en España, bajo hipótesis conservadoras, se sitúa en torno a 88 millones de toneladas de biomasa primaria en verde, incluyendo restos de masas forestales existentes, restos agrícolas, masas existentes sin explotar y cultivos energéticos a implantar. A este potencial se suman más de 12 millones de toneladas de biomasa secundaria seca obtenida de residuos de industrias agroforestales.

Según el PER 2011-2020 se esperan en los próximos años, una importante expansión de la biomasa. Por consiguiente, además de avanzar en una mayor aportación cuantitativa de la biomasa, se producirá un cambio cualitativo en las tecnologías y en la eficiencia.

3.4. Balance socioeconómico

La implantación del PER 2011-2020 generará una serie de efectos económicos directos y que son cuantificables y susceptibles de ser sumados y restados como parte de un balance económico, como está sujeto a hipótesis, el resultado de la estimación puede variar.

Estos efectos son evitar el aumento de importaciones de energía, de especial relevancia las de gas natural y las de gasóleo y la reducción en emisiones de CO₂.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

A continuación se detalla el balance con los distintos efectos:

BALANCE ECONÓMICO DE EFECTOS DIRECTOS			
BENEFICIOS (Millones de €)		COSTES (Millones de €)	
Menor importación de gas natural	17.412	1.037	Ayudas públicas a la inversión
Menor importación de gasóleo	7.125	155	Costes de financiación
Ahorro por reducción de consumo de gasolina	981	67	Otros gastos
Ahorros por reducción de emisiones de CO ₂	3587	23.235	Prima equivalente régimen especial
		191	Sistema de incentivos al calor renovable
		99	Menor recaudación IH (*)
TOTAL	29.105	24.784	TOTAL

Tabla 10: Balance económico de efectos directos[9]

(*) Menor recaudación en impuestos de hidrocarburos correspondientes a biocarburantes.

Como podemos ver en el balance, los costes son inferiores a los beneficios que aporta el PER, aproximadamente un 15 % menor, debido mayoritariamente al ahorro en combustibles fósiles.

Por último, existen otros efectos beneficiosos, que son más difíciles de cuantificar, los cuales se detallan a continuación.

OTROS BENEFICIOS	
Creación acumulada de riqueza (incrementos de contribución al PIB) durante 2011-2020 (millones de €)	33.607
Estimación de empleo total vinculado a las energías renovables en 2020	302.865
Exportación de tecnología	

Tabla 11: Otros beneficios[9]



3.5. Creación de riqueza

Para ver la creación de riqueza debemos estudiar la contribución directa de este sector al PIB nacional. Se cuantifica el impacto derivado de las actividades de las empresas del sector (Contribución directa al PIB) y el impacto derivado de las actividades de las empresas fuera del sector pero que proveen de bienes y/o servicios al sector. (Contribución indirecta al PIB)

	2005	2006	2007	2008	2009	2015	2020
Contribución directa al PIB	4.672,2	5.079,6	4.811	6.437,5	7.321,9	10.000	13.000
Contribución indirecta al PIB	2.209,9	2.408,3	2.475,3	2.959,5	2.961,4	3.700	5.000
Contribución total al PIB	6.882,1	7.487,9	7.286,3	9.397	10.283,3	13.700	18.000
% que representa el sector sobre el PIB de España	0,69%	0,72%	0,67%	0,87%	0,98%	----	----

Tabla 12: Creación de riqueza 2005-2020[9]

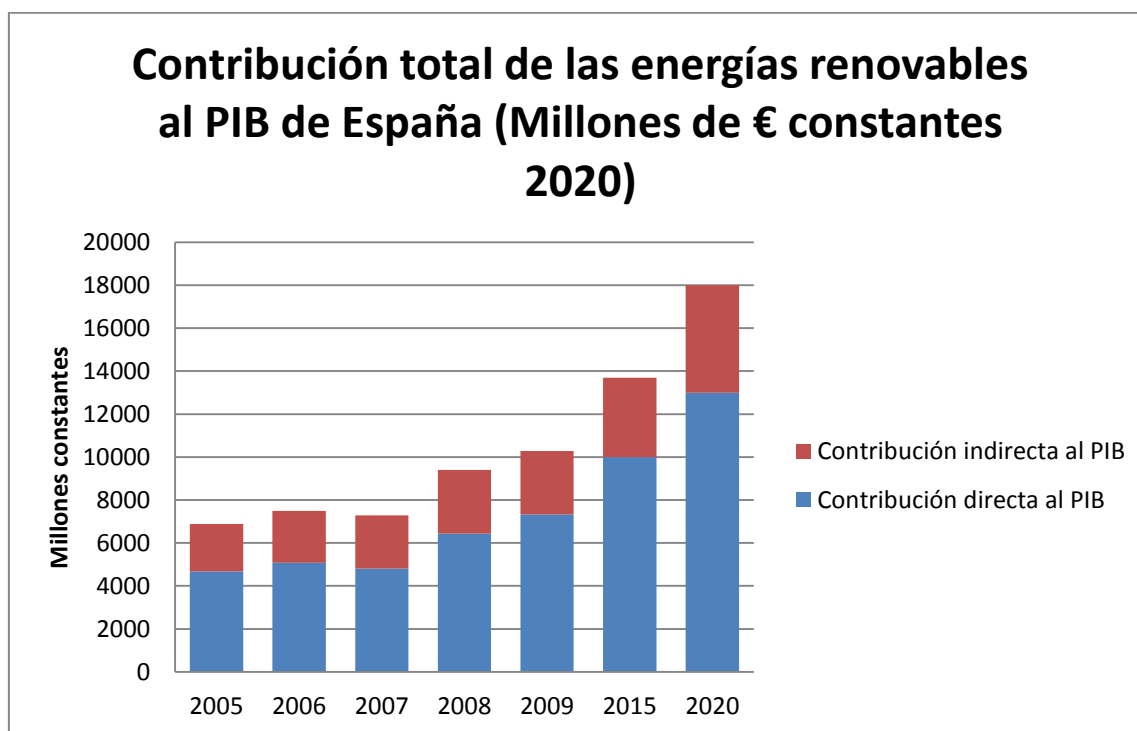


Figura 9: Contribución total de las energías renovables al PIB de España[9]

Otro factor a estudiar es el saldo neto de exportaciones, que deberá ser positivo (exportaciones superiores a importaciones).

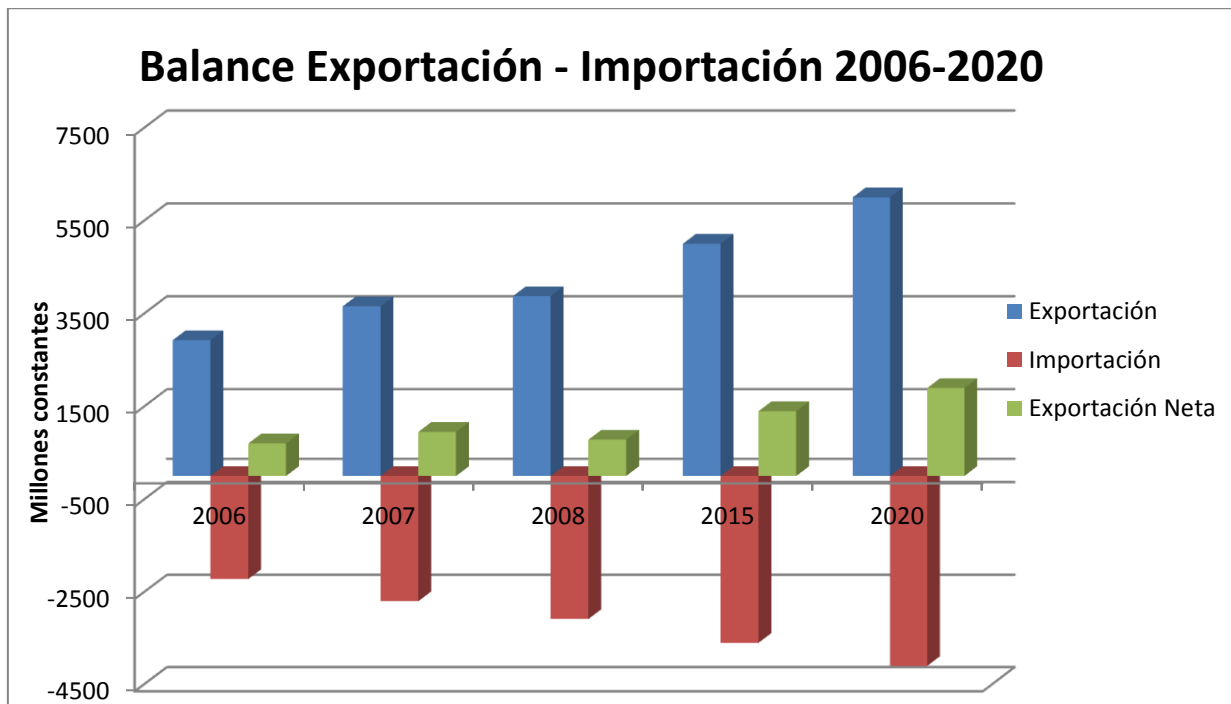


Figura 10: Balance exportación-importación 2006-2020[9]

	2006	2007	2008	2015	2020
Exportación Neta (Millones)	699,3	948,5	780,6	1.394	1.893,1

Tabla 13: Exportación Neta 2006-2020

El sector presenta un saldo neto de exportaciones positivo durante todos los años estudiados.

3.6. Creación de empleo

En 2010, los puestos de trabajo debido al sector de las energías renovables, según el estudio realizado por el Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS) e IDAE, fueron 88.209 de forma directa y 60.185 de forma indirecta, lo que alcanza la cifra de 148.394 empleos.

El 90 % del trabajo es concentrado en el sector eólico, biomasa y solar tanto fotovoltaica, solar térmica y solar termoeléctrica. Se trata, de empleos de calidad, cualificados y bajo la modalidad de contratación indefinida.

Según las previsiones de empleo para el año 2020, el sector de las energías renovables generaría 180.175 de forma directa y 122.691 de forma indirecta, lo que alcanza la cifra de 302.866 empleos. Esta estimación prevé un incremento del 104 % del empleo en el sector de las energías renovables entre 2011 y 2020. El mayor aumento se da en las fases de operación y mantenimiento, debido al aumento de la potencia acumulada.



El sector eólico, solar y biomasa seguirán siendo las que mayor porcentaje de trabajos registren. La biomasa ofrecerá nuevas oportunidades de empleo y de desarrollo regional, especialmente en zonas rurales y aisladas, convirtiéndose en un importante motor en el desarrollo social y económico.

3.7. Balance de emisiones de CO₂

En este punto se valorará la contribución de las energías renovables a la limitación de emisiones de CO₂. La generación de energía es responsable del 80% de las emisiones de efecto invernadero, por lo que la incorporación de energías renovables en este sector ayudará a reducir las emisiones.

Para estimar el CO₂ evitado, se asume que de no haberse generado la electricidad con energías renovables se hubiera generado con energías no renovables como las fósiles, en un ciclo combinado con gas natural con rendimiento próximo al 50%.

Las tres áreas estudiadas para estimar el CO₂ evitado son:

- Área Eléctrica
- Área Térmica
- Área Transporte

Emisiones evitadas entre 2011-2020 (tCO ₂)	
Energías Renovables- Generación de Electricidad	
Hidroeléctrica	592.172
Eólica	62.712.996
Eólica marina	1.554.616
Solar Termoeléctrica	32.569.924
Solar fotovoltaica	12.934.085
Biomasa	10.587.673
Biogás	3.093.316
Residuos domésticos renovables	1.586.777
Energía del mar	235.108



Geotérmica	217.767
TOTAL ÁREAS ELÉCTRICAS	126.084.435
Energías Renovables- Calefacción y Refrigeración	
Biomasa y residuos	11.280.173
Biogás	975.152
Geotérmica	65.412
Paneles solares	4.969.922
Bomba de calor	486.308
TOTAL ÁREAS TÉRMICA	17.776.967
Biocarburantes – Transportes	
Biodiesel	24.516.882
Bioetanol	2.543.943
TOTAL ÁREA TRANSPORTE	27.060.825
CO2 EVITADO ACUMULADO ENTRE 2011 – 2020 (tCO₂)	170.922.226

Tabla 14: Emisiones evitadas 2011-2020[9]


La implantación de las energías renovables entre 2011 y 2020 evitará 170 millones de toneladas de dióxido de carbono, de los cuales, el 12.8% son evitadas por el uso de biomasa (sin contar biocarburantes), aproximadamente 22 millones de toneladas de dióxido de carbono.

El porcentaje de tCO₂ evitadas por el uso de energías renovables es diferente en cada área:

- Área Eléctrica → 73,8%
- Área Térmica → 10,4%
- Área Transporte → 15,8%

El porcentaje de tCO₂ evitadas por el uso de biomasa es diferente en cada área:

- Área Eléctrica → 8,4%
- Área Térmica → 63,4%

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

- Área Transporte → 0%

La biomasa es la principal energía renovable en evitar CO₂ en el área térmica y el cuarto en el área eléctrica.



4. VENTAJAS DE LA BIOMASA

El uso de la biomasa como energía renovable frente a las energías no renovables, como los combustibles fósiles, tiene las siguientes ventajas:

- No contribuye al efecto invernadero.
- Reducir las emisiones de azufre.
- Reducir las emisiones de partículas.
- Reducir las emisiones CO, HC y NO_x
- Ciclo neutro de CO₂.
- Posibilidad de utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema en el terreno.
- Reduce la dependencia energética con las energías no renovables fósiles.
- Reducción de los peligros asociados a los combustibles derivados del petróleo.
- Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos
- Crecimiento socioeconómico en las áreas rurales

Con estas ventajas, la biomasa en el futuro será una fuente de energía potencial, siendo un elemento de gran importancia en las zonas rurales.



5. OBEJETIVOS

5.1. Objetivo general

Realización de un proyecto básico de una planta de biomasa en España, que empleará como combustible Eucalipto Globulus.

5.2. Objetivo parcial


- Análisis de las diferentes tecnologías y tipos de calderas disponibles para la combustión de biomasa.
- Mejoras en el ciclo Rankine de la planta.
- Estudio de impacto medio ambiente de la planta.



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

BLOQUE II: DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

1. LOCALIZACIÓN

1.1. Estudio preliminar

En el estudio preliminar de la localización de la planta de biomasa se estudian los siguientes criterios que se deben cumplir para asegurar un buen funcionamiento de la misma.

Los principales criterios que vamos a estudiar en este punto son:

- Seguridad de aprovisionamiento de combustible
- Seguridad de abastecimiento de agua
- Mínimo impacto medio ambiental en la fauna y flora de la zona
- Mínimo impacto a núcleos urbanos
- Accesibilidad

Seguridad de aprovisionamiento de combustible

El principal factor a tener en cuenta para decidir la localización de una planta es el abastecimiento del combustible, ya que si el coste de obtener el combustible fuese muy elevado, no sería rentable la planta.

En este proyecto, se ha elegido como combustible para la planta, el Eucalipto Globulus, como se ha indicado en bloque anterior.

Las comunidades con mayor cantidad de hectáreas de Eucalipto en España y por lo que mayor seguridad de abastecimiento de biomasa son:

- Galicia
- Cantabria
- Asturias
- Extremadura
- Andalucía
- País Vasco

Se ha realizado un estudio de las hectáreas de Eucalipto de cada comunidad y se ha elaborado las siguientes figuras, que nos muestra la relación entre hectáreas de Eucalipto y Superficie total de la comunidad, esta medida, nos dará una mejor visión de la densidad de eucalipto de cada comunidad:

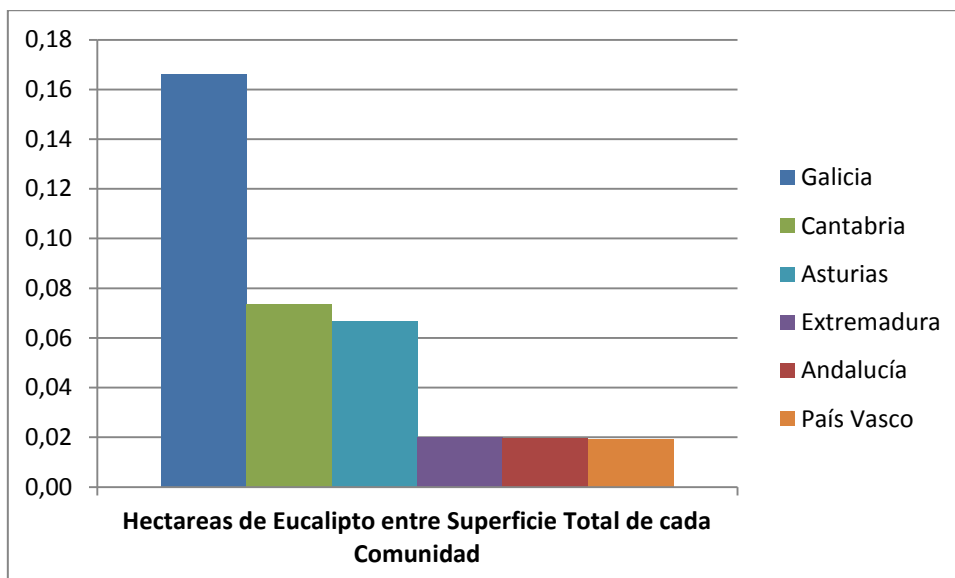


Figura 11: Hectáreas de Eucalipto entre superficie total de cada comunidad[4]


Como podemos observar en la figura 11 la comunidad autónoma con mayor densidad de Eucalipto es Galicia, por lo que, la planta se localizará en esta Comunidad Autónoma, a continuación concretaremos más el emplazamiento de la planta.



Figura 12: Provincias de la Comunidad Autónoma de Galicia

La comunidad autónoma de Galicia cuenta con cuatro provincias:

- A Coruña
- Pontevedra
- Lugo
- Ourense

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Como hemos indicado anteriormente, la planta deberá encontrarse en la provincia con mayor densidad de Eucalipto, así que, realizando el mismo análisis anterior, obtenemos la siguiente figura.

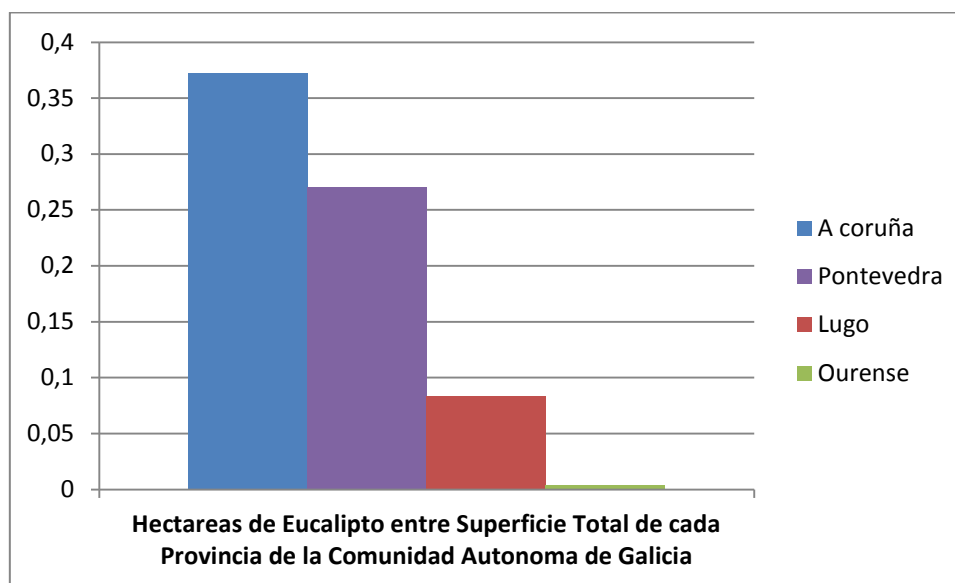


Figura 13: Hectáreas de Eucalipto entre superficie total de cada provincia de la Comunidad Autónoma de Galicia[5]

Podemos observar en esta figura la densidad de Eucalipto de las distintas provincias, a simple vista, se concluye que la mejor provincia para localizar nuestra planta es A Coruña.

Para poder concretar más la ubicación de la planta, se sigue con los criterios anteriormente mencionados

Seguridad de abastecimiento de agua

Para asegurar el abastecimiento de agua a la planta, se busca un emplazamiento dentro de la provincia de A Coruña, cerca de un río o lago, con caudal suficiente para el abastecimiento de la planta sin afectar al medio ambiente de la zona.

Los ríos y lagos de la provincia de A Coruña pertenecen a la Confederación Hidrográfica de Aguas de Galicia, será el organismo al cual se le deberá llevar el proyecto básico, para la validación del sistema de captación de agua y vertido de la planta de biomasa.

Mínimo impacto medio ambiental en la fauna y flora de la zona

El emplazamiento debe estar ausente de espacios naturales protegidos, ya que está prohibida la construcción en ellos, así pues, se descartaran las zonas protegidas por la Red Natura 2000 creada por la Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992. La Red Natura 2000



está formada por las Zonas de Especial Conservación (Z.E.C.), por los Lugares de Interés Comunitario (L.I.C.) y por Zona de Especial Protección de Aves (Z.E.P.A.) así como sus alrededores.

Mínimo impacto a núcleos urbanos

La localización de la planta deberá encontrarse lejos de los núcleos urbanos, para que las emisiones de la planta no afecten a las personas, pero considerando que debe ser accesible para los trabajadores de la planta.

Accesibilidad

La planta deberá contar con un sistema de carreteras cercano, para facilitar el acceso del personal de la planta y de los camiones que transportan la biomasa.

1.2. Situación exacta de la planta

La situación exacta de la planta de biomasa está en el término municipal de Valle Del Dubra, Provincia de A Coruña, en la Comunidad Autónoma de Galicia.



Figura 14: Localización de Termino municipal de Valle del Dubra en la comunidad autónoma de Galicia.



Figura 15: Localización de Termino municipal de Valle del Dubra en la provincia de A Coruña.



Figura 16: Ubicación exacta de la planta de biomasa en el término municipal Valle del Dubra.[6]

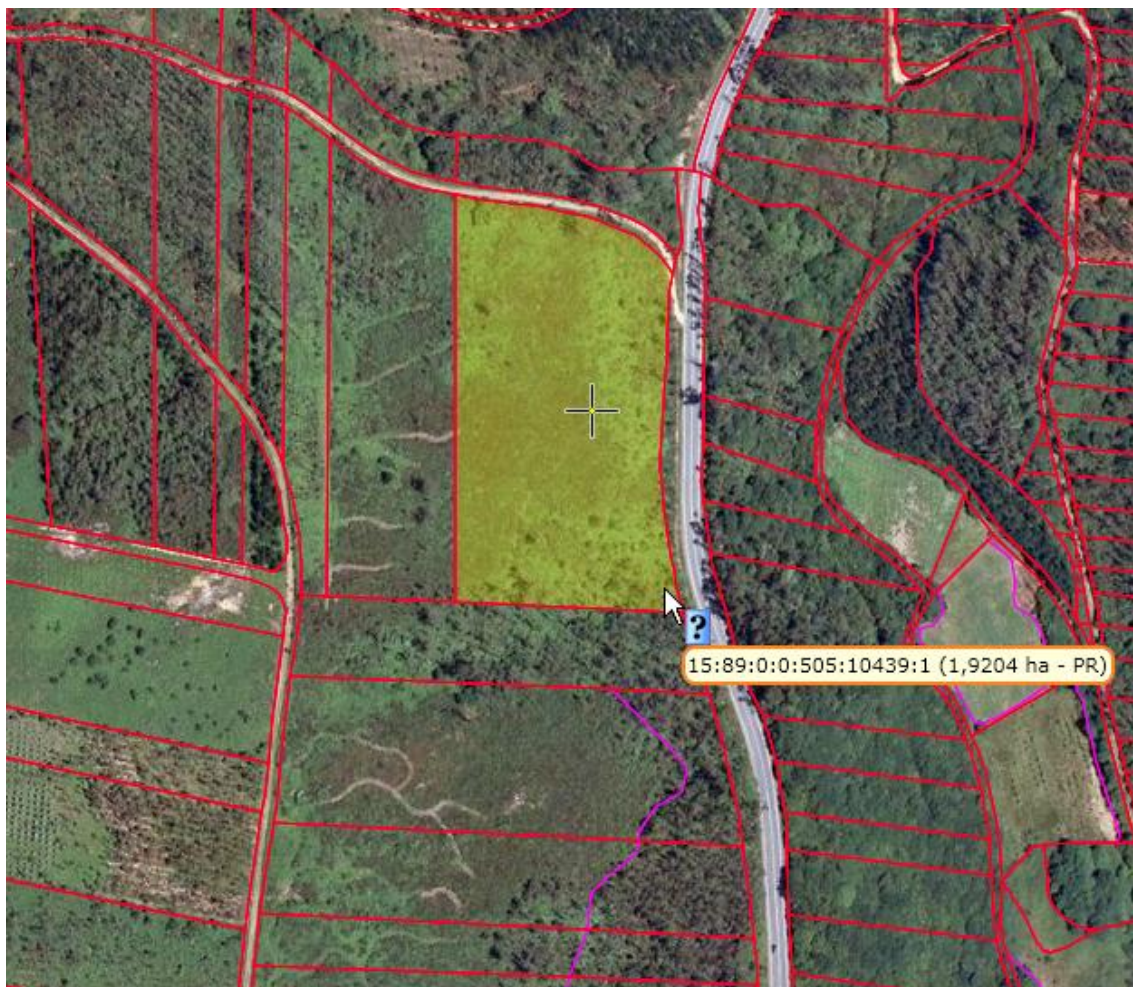


Figura 17: Parcela donde se situará la planta. [4]

La figura 17, nos muestra la situación exacta donde estará la planta de biomasa, esta parcela cumple con todos los criterios antes mencionados.

Sus coordenadas aproximadas son:

Latitud 43 ° 4' 32.08 " N

Longitud 8 ° 40 ' 23.95" W

UTM 29

X= 526.456,04 m

Y =4.769.402,00 m

Las características de la parcela son:

- Polígono: 505
- Parcela: 10439
- Superficie Ha: 1.9204
- Uso: Pasto arbustivo

Demostración del cumplimiento de los criterios antes mencionados.

Seguridad de aprovisionamiento de combustible

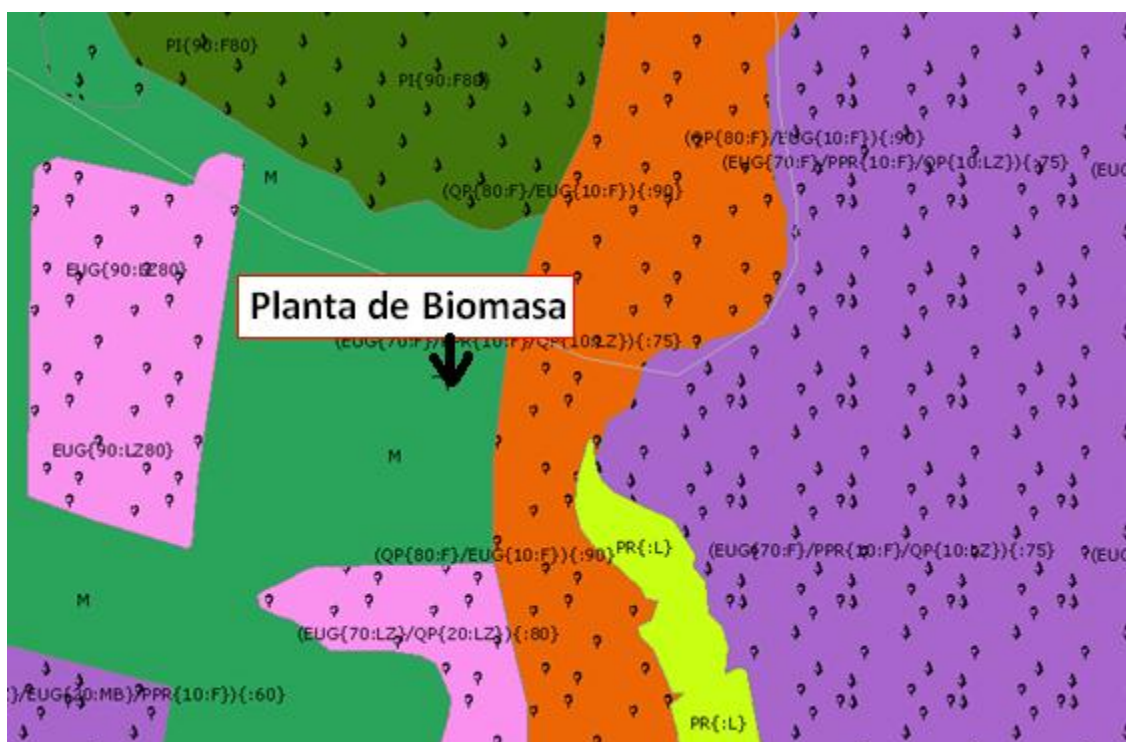


Figura 18: Diferentes usos de las zonas próximas a la planta. [5]

En la figura 18 se pueden ver los distintos usos de las zonas alrededor de la planta.

- Zona Rosa: Uso exclusivo de Eucalipto, Área total 7.59 ha
- Zona Morada: Uso Asociación de Coníferas y Eucaliptos, Área total 344.4 ha
- Zona Verde Oscuro: Uso exclusivo Coníferas, Área 100.68 ha
- Zona Naranja: Uso Otras Frondosas, Área 40.94 ha
- Zona Amarilla: Uso Prado Natural, Área 3.18 ha



Seguridad de abastecimiento de agua

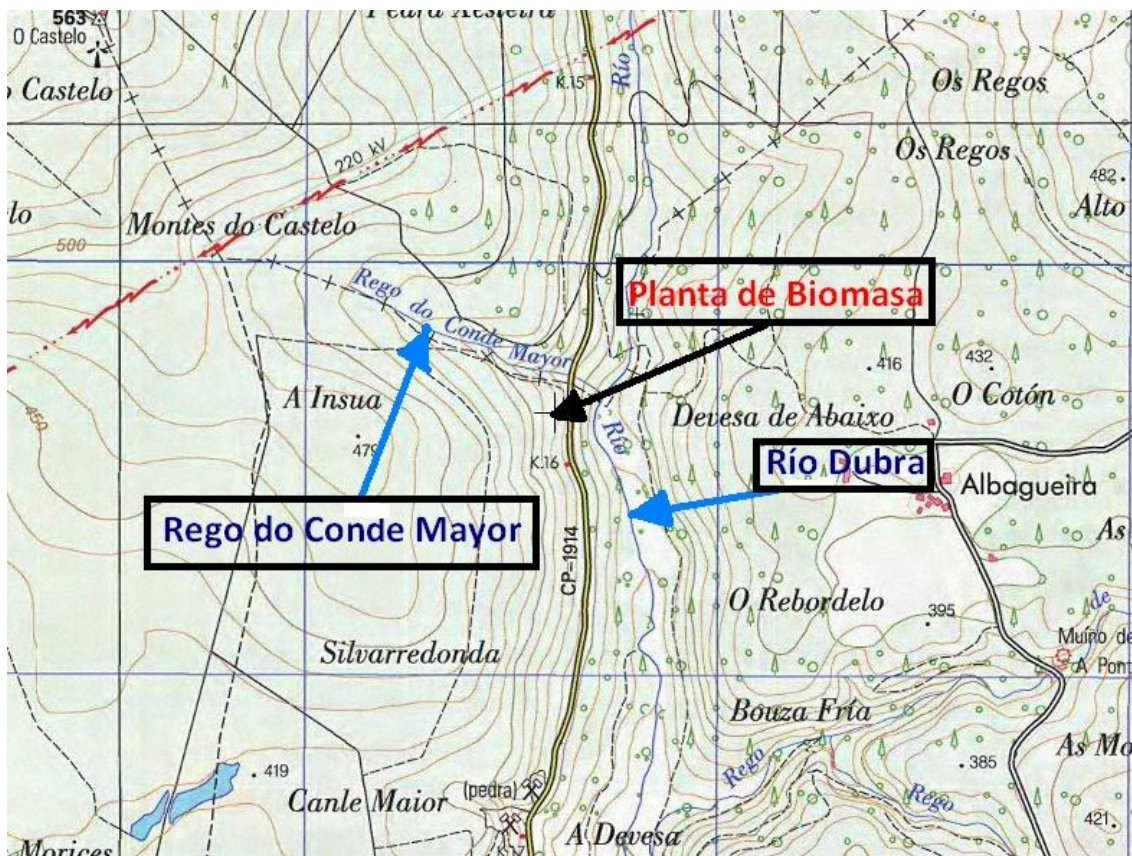


Figura 19: Ríos pertenecientes a Aguas de Galicia, próximos a la planta de biomasa. [4]

Como podemos observar en la figura 19, los ríos más próximos a la planta de biomasa son:

- Rego do Conde Mayor (Río del Conde Mayor)
- Río Dubra

El río del Conde Mayor es un río menor que desemboca en el río Dubra, el cual es un afluente del Tambre y desemboca en Portomouro tras recorrer 15 km.

El río Dubra presenta una sección regular, estable y de gran calado, con ligera vegetación de ribera.




Mínimo impacto medio ambiental fauna y flora



Figura 20: ZEPA y LIC próximos a la planta de biomasa.[3]

Como se puede observar en la figura, la planta de biomasa no se encuentra en ninguna zona protegida ni próxima a ninguna ZEPA ni LIC.

El LIC más próximo es el Río Anllón a 25 km al norte.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Mínimo impacto a núcleos urbanos

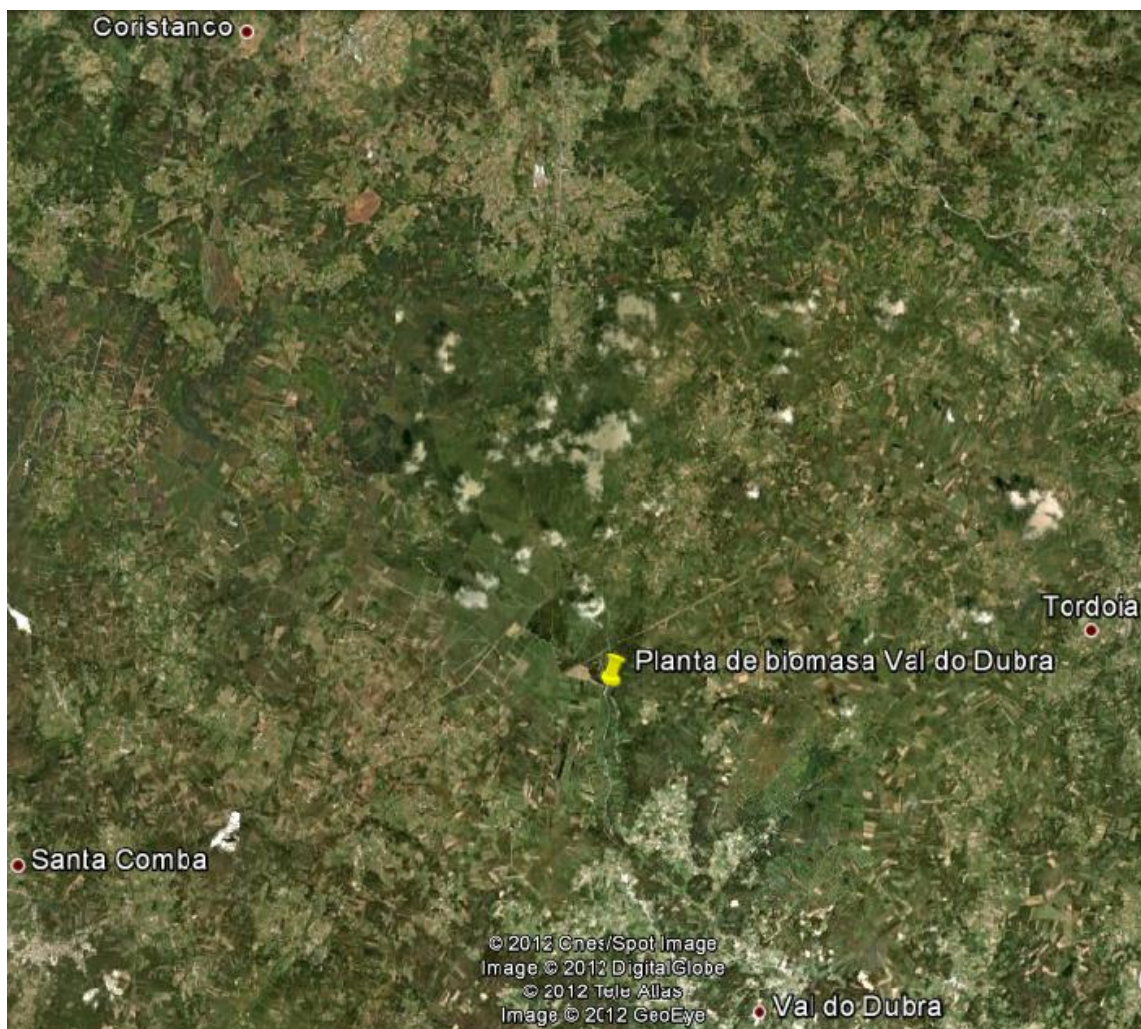


Figura 21: Poblaciones más importantes próximas a la planta de biomasa[19]

Las poblaciones más importantes en el entorno cercano del emplazamiento son:

- Coristanco (A Coruña) a aproximadamente 14,45 km al noroeste del emplazamiento.
- Santa Comba (A Coruña) a aproximadamente 11,76 km al sureste del emplazamiento.
- Tordoia (A Coruña) a aproximadamente 9,5 km al oeste del emplazamiento.
- Val do Dubra(A Coruña) a aproximadamente 6,6 km al sur del emplazamiento.

Accesibilidad

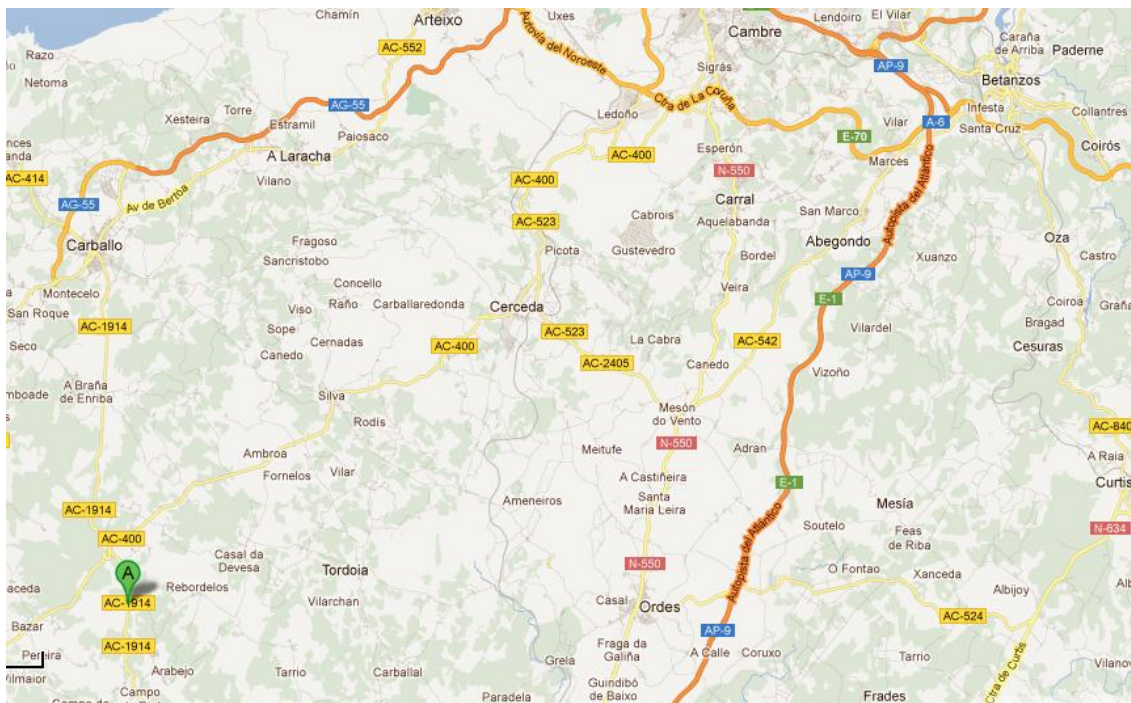



Figura 22: Mapa de carreteras proximidades de la planta de biomasa[6]

La planta se encuentra en el punto A de la figura 22, tendrá fácil acceso a través de la AC 1914. A la planta se entrará mediante un camino ya existente, que será modificado para permitir la entrada y salida de camiones, durante la obra civil y abastecimiento de la planta.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Ruta de acceso

Desde la A6: dirección A Coruña

Tomar salida AG-55 dirección Carballo, tomar la salida AC-552, hacia la carretera AC-1914, hasta la entrada de la planta. (Ver Figura 23)



Figura 23: Entrada a la planta de biomasa[6]



2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

2.1. Introducción

La planta de biomasa de este proyecto se ha diseñado con una caldera de generación de vapor, mediante el aprovechamiento del calor generado durante la combustión de la biomasa, procedente de bosques y cultivos energéticos de eucalipto.

Buscaremos diseñar el proceso para obtener 9 MWe los cuales se evacuarán a la red eléctrica. La planta tendrá unos autoconsumos estimaremos de aproximadamente 1 MW. Por ello, la turbina generará 10 MW, además impondremos varios valores de diseño como la temperatura y presión de la caldera y la presión de condensación.

$$T_{S_caldera} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{Caldera} = 80 \text{ bar}$$

$$P_{Condensador} = 0.08 \text{ bar}$$

La planta de biomasa, se divide en varios sistemas necesarios para su correcto funcionamiento.

- Sistema de tratamiento de biomasa
- Ciclo Rankine (ciclo cerrado agua/vapor)
- Sistema de refrigeración
- Sistema de tratamientos de aguas

El primer sistema que nos encontramos en la planta es el sistema de tratamiento de biomasa, encargado de recibir y almacenar la biomasa para su posterior tratamiento, con la finalidad de obtener el combustible con las características optimas para alimentar a la caldera.

El ciclo Rankine, gracias al ciclo cerrado de agua/vapor podemos aprovechar el calor cedido por la combustión de la biomasa y evaporar el agua que entra en la caldera, hasta obtener vapor sobrecalentado, que se usará para hacer girar la turbina de vapor conectada al generador eléctrico.

El sistema de refrigeración es el encargado de refrigerar el vapor de salida de la turbina de vapor, con el fin de condensar el agua en el intercambiador que se encuentra en el condensador, para poder así reenviarla a la caldera.

Por último, el sistema de tratamiento de aguas es el sistema encargado de tratar el agua para su posterior suministro a los distintos puntos de la planta que la necesitan y su vertido. Cada punto de la planta necesita un suministro de agua con características distintas, por ello, el sistema de tratamiento de aguas estará formado por diversos equipos de tratamientos de aguas.



2.2. Diagrama de los distintos sistemas.

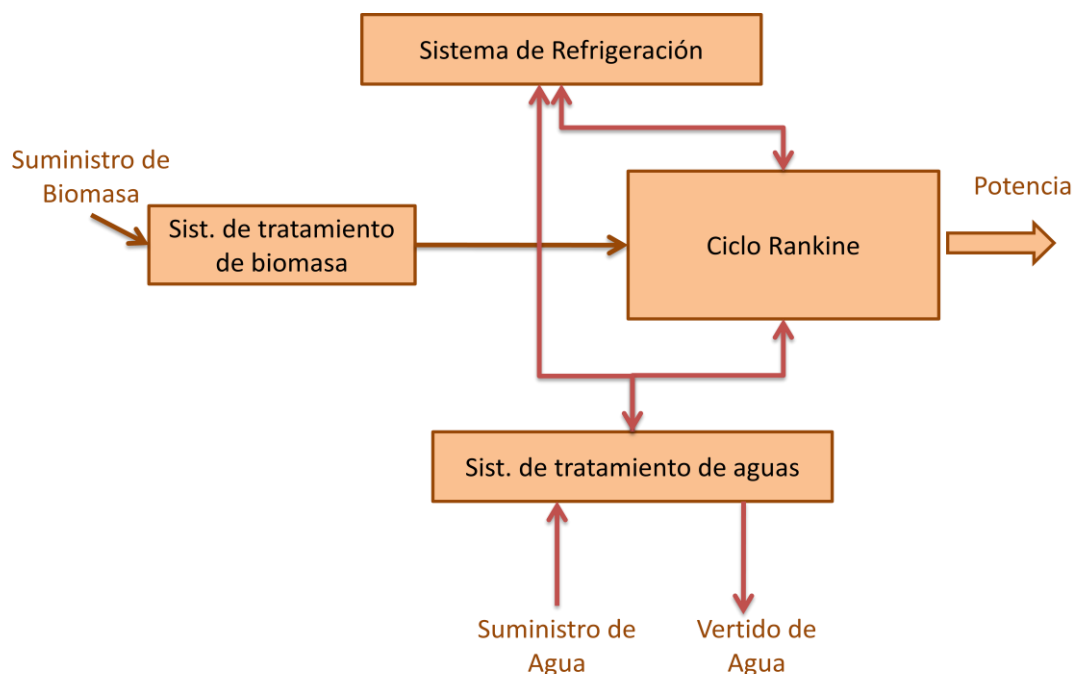


Figura 24: Diagrama de bloques de los distintos sistemas de la planta

En el diagrama anterior podemos observar los distintos sistemas que componen la planta de biomasa, así como los flujos de agua y biomasa del proceso completo, que se detallaran en puntos posteriores.

2.3. Equipos de los distintos sistemas

2.3.1. Sistema de tratamiento de biomasa.

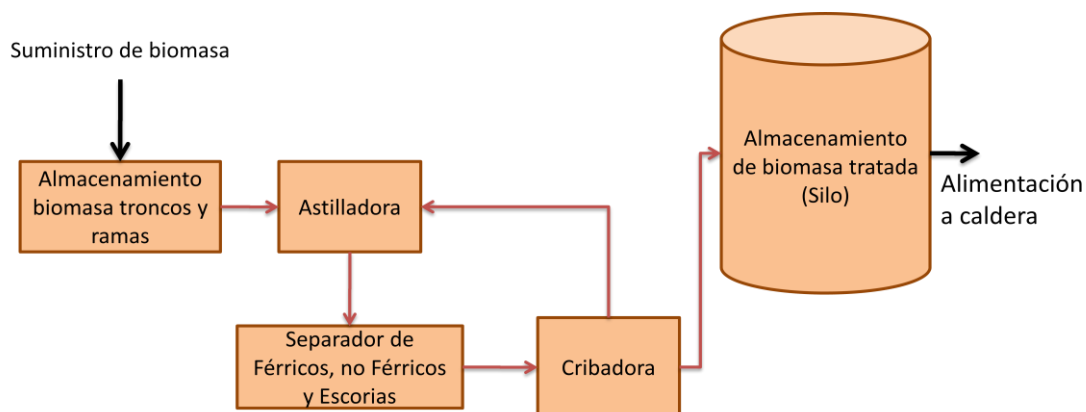



Figura 25: Sistema de tratamiento de biomasa

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

La planta contará con un sistema de tratamiento de biomasa encargado de triturar el suministro de biomasa de troncos y ramas de eucalipto hasta un tamaño óptimo para la combustión en caldera. Para ello, la planta contará con una astilladora capaz de triturar ramas y troncos de eucalipto; a la salida de la astilladora, las astillas se transportarán al sistema de limpieza y cribado, el cual recirculará las astillas no validas para la combustión para una nueva trituración y las óptimas se almacenaran en el silo para su posterior combustión.

- Almacenamiento de la biomasa en troncos y ramas
- Astilladora
- Equipos de limpieza y cribado
- Silo
- Almacenamiento de biomasa en troncos y ramas.

El almacenamiento de biomasa está encargado de proporcionar seguridad en el suministro de biomasa a la planta.

El apilamiento de la biomasa se realizará en cordones troncopiramidales.

Astilladora

El tipo de astilladora dependerá de la forma de suministro de la biomasa, en nuestro caso, será mediante troncos y ramas, por lo que, la astilladora se encargara de triturar la biomasa hasta las características optimas para su combustión en la caldera.

Equipos de limpieza y cribado


El sistema de tratamiento de biomasa cuenta con equipos de limpieza y cribado que se encargan por una parte de eliminar los sobretamaños de la biomasa y por otra parte, de eliminar elementos no deseados como materiales férreos, no férreos y escorias.

Implantar estos procesos permite obtener un combustible de mayor calidad para la caldera de la planta de biomasa y evitar así mantenimientos no programados en la instalación, atrancamientos en los sistemas de transporte de la biomasa, roturas y obstrucciones en la caldera por objetos extraños.

Los equipos encargados de la limpieza y cribado son:

Separador de férreos: Son sistemas basados en la eliminación elementos derivados del hierro que pudieran encontrarse en la biomasa suministrada.

Sistema de limpieza de escorias: Sistema de limpieza de piedras y objetos extraños para evitar posibles roturas en la cámara de combustión de la caldera.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Separador de no férreos: Son sistemas basados en la eliminación elementos no derivados del hierro que pudieran encontrarse en la biomasa suministrada

Cribado de astillas de biomasa: Sistema encargado de separar las astillas de biomasa que pudieran ocasionar atrancamientos de los equipos de transporte y alimentación de la caldera.

Silo

El silo es el sistema de almacenamiento de biomasa, encargado de proporcionar seguridad en el suministro de combustible a la planta, con el propósito de incrementar la fiabilidad de la alimentación de combustible a la caldera. Además, tendrá capacidad para el abastecimiento durante varios días.

El silo será de tipo horizontal de carga-descarga basado en la utilización de los siguientes equipos:

- Sistema de extracción de biomasa
- Tolvas de descarga
- Equipo de transporte de biomasa



2.3.2. Sistema de tratamiento de aguas

El sistema de tratamiento de aguas de la planta se encarga de tratar las aguas de captación y vertido necesarias para el funcionamiento de la planta.

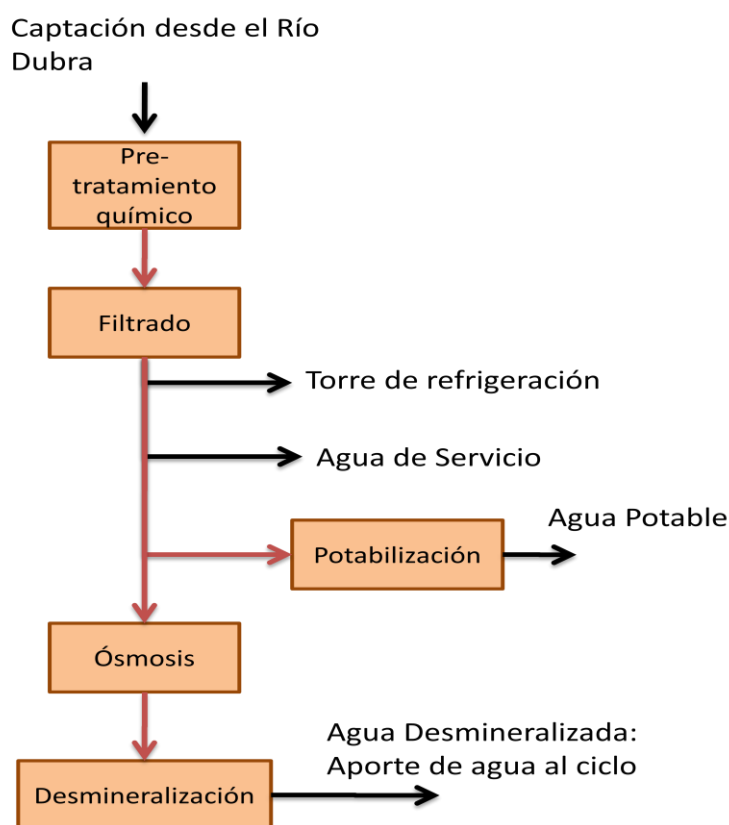



Figura 26: Sistema de captación

Captación

La captación consiste en un grupo de bombeo que lleva el agua desde el río Dubra hasta la planta. Esta agua no tiene las condiciones necesarias para su uso en la planta. Por ello, será necesario un sistema de tratamiento de aguas para su acondicionamiento para su posterior almacenamiento y uso, dichos tratamiento son:

- Pre-tratamiento químico
- Filtrado
- Desmineralización
- Potabilización

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Pre-tratamiento químico

El pre-tratamiento químico será previo al envío de agua al sistema de filtración. El sistema tendrá la función de inyectar al agua bruta procedente del río, la dosificación adecuada de productos químicos; agente coagulante, ácido sulfúrico e hipoclorito sódico, para su desinfección.

Filtrado

El sistema de captación necesitará un sistema de filtrado para evitar la entrada de cuerpos extraños (rocas, tierra, etc.), evitando así atrancos en las tuberías y bombas de captación y además de proteger los demás sistemas de tratamiento de agua.

Desmineralización

La desmineralización tiene como objetivo la obtención de agua exenta de minerales y libre de iones, obteniendo así una gran calidad, para el aporte de agua al ciclo cerrado de agua/vapor.

La desmineralización consta de dos partes:


- Osmosis Inversa
- Desmineralización

La osmosis inversa, se encarga de eliminar las sales presentes en el agua procedente de la filtración.

La desmineralización se lleva a cabo en un módulo de EDI (electrodesionización), obteniéndose el agua desmineralizada libre de iones, que se empleará en el aporte de agua del ciclo Rankine.

Potabilización

La planta contará con una pequeña potabilizadora encargada de cubrir las necesidades de agua potable de la planta. La potabilizadora contará con un conjunto de equipos para cumplir el *RD 140-2003 de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. Estos equipos dependerán de las características del agua del río Dubra.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

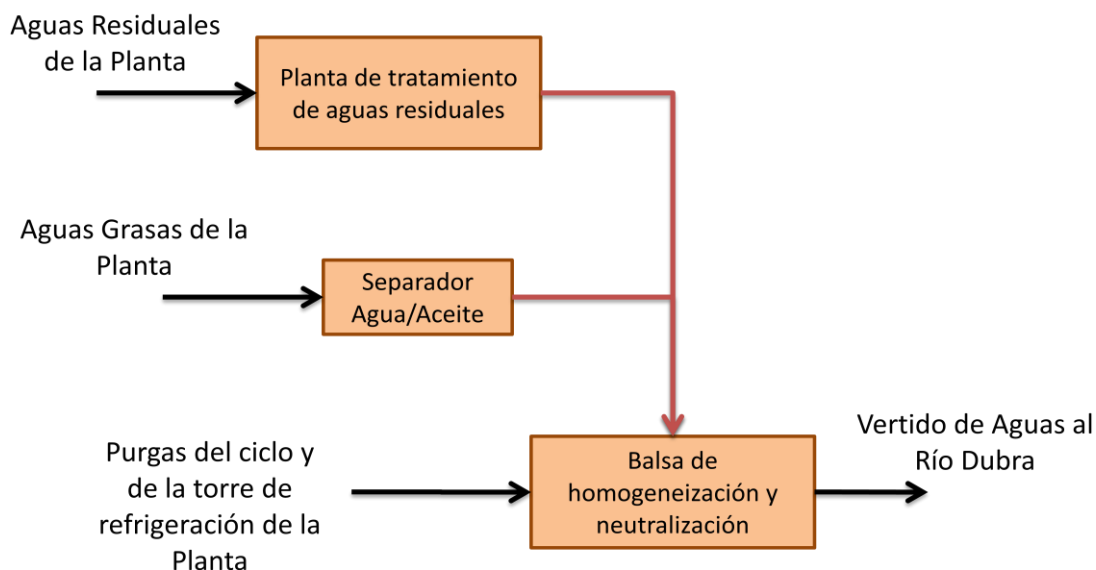


Figura 27: Sistema de vertido

Vertido


El vertido consiste en un grupo de bombeo que lleva el agua desde la planta hasta el río Dubra. Esta agua antes de su vertido ha debido ser tratada para cumplir con el *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. TÍTULO V. De la protección del dominio público hidráulico y de la calidad de las aguas continentales. CAPÍTULO II. De los vertidos. SECCIÓN I. Vertidos al dominio público hidráulico. Artículos 100-108.*

Los equipos más habituales en tratamiento de aguas residuales industriales en plantas de biomasa son:

- Separador de agua/aceite
- Balsa de homogeneización-neutralización
- Planta de tratamiento de aguas residuales

Separador de agua/aceite

El separador aceite/agua es un equipo en el que mediante diferencia de densidad, se consigue separar el agua, de aquellas grasas o aceites que no se encuentren disueltas, mediante decantación. Seguidamente se mandará el agua tratada a la balsa de homogeneización y neutralización y los fangos serán retirados por una empresa autorizada para ese fin.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Balsa de homogeneización y neutralización

La balsa de homogeneización tiene como función la recepción de los diferentes tipos de aguas residuales que se producen en la planta y la neutralización del pH, con objeto de acondicionarlo a unos valores comprendidos entre 6-9.

Algunas de las aguas que llegan a esta balsa han sido tratados previamente, como es el caso de las aguas residuales con grasas y las aguas residuales sanitarias, mientras que otros son introducidos directamente en la balsa, como son las purgas procedentes de la torre de refrigeración, que tendrán una mayor concentración de sales por lo que podrán ser enviadas directamente a la balsa de homogeneización, ya que no cuentan con sustancias tóxicas disueltas.

Planta de tratamiento de aguas residuales

Es el equipo encargado de tratar las aguas residuales procedentes de los servicios y aseos del personal de la planta, el objetivo de la depuración es lograr aguas tratadas con unas características que permitan su redireccionamiento a la balsa de homogeneización para su posterior vertido al río Dubra.

La planta de tratamiento de aguas residuales está compuesta por:

- Arqueta de desbaste
- Reactor biológico
- Decantador

La primera etapa es la arqueta de desbaste. Su función es impedir la entrada de elementos de gran volumen que puedan estropear el funcionamiento de los distintos equipos que constituyen la planta de tratamiento de aguas residuales.

Después el agua residual es introducida en el reactor biológico, donde se realizará la oxidación biológica de la materia orgánica mediante la utilización de microorganismos y aire. El aire necesario para la oxidación es introducido mediante soplantes en la parte inferior del reactor.

Finalmente la corriente de salida del reactor biológico pasa al decantador donde por efecto de la gravedad precipitarán los fangos, obteniendo agua clarificada y fangos.

El agua clarificada se enviará a la balsa de homogeneización y neutralización para su posterior vertido y una parte de los fangos se recirculará al reactor biológico. Los fangos sobrantes se acumularán para su posterior recogida por el gestor de residuos autorizado.



2.3.3. Sistema de refrigeración

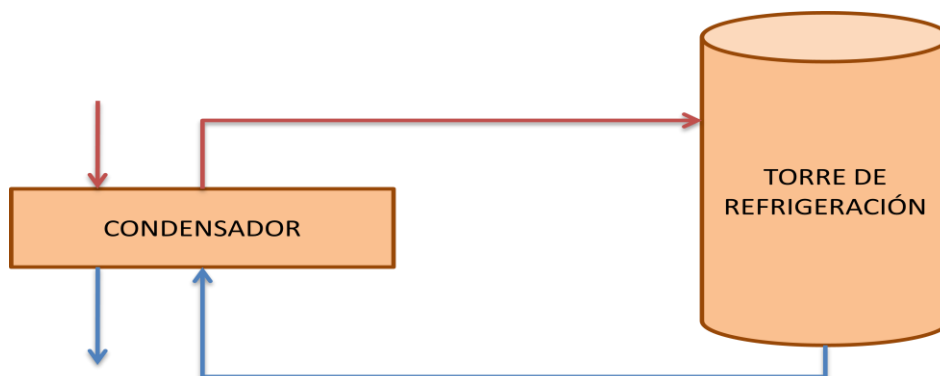


Figura 28: Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración seleccionado para la planta de biomasa es el sistema de refrigeración cerrada mediante torre húmeda de tiro forzado. Se ha seleccionado este sistema frente a los de sistema abierto debido a su menor impacto medioambiental, y la torre de tiro forzado debido a que es una planta de poca potencia donde no es rentable la implantación de una torre de tiro natural. Los sistemas de refrigeración basados en aerocondensadores normalmente son elegidos cuando no se puede refrigerar mediante agua, debido a su peor rendimiento y mayor coste.

Las funciones principales del sistema de refrigeración son:

- Refrigerar el condensador
- Enfriar el agua del circuito de la torre
- Limpiar el interior de los tubos del condensador

La refrigeración del condensador se realizará mediante el intercambio de calor, en contracorriente, entre el agua proveniente de la balsa de la torre y el vapor de salida de la turbina. Con esto se generará un incremento de la temperatura del agua del circuito de la torre, la cual, regresa a la parte superior de la torre de refrigeración para realizar su enfriamiento, gracias a un conjunto de difusores en la parte superior de la torre. Estos, distribuirán el agua a través del relleno de la torre, para lograr que se enfríe mediante el contacto con el aire inducido por los ventiladores. Por otro lado, el agua enfriada será recogida en la balsa inferior de la torre, para su posterior envío al condensador.

Para mantener el nivel de salinidad de la balsa se realizarán pequeñas purgas, que serán llevados al sistema de tratamiento de aguas mediante gravedad.



La torre de refrigeración contará con un sistema de aporte de agua procedente del sistema de captación, que suplirá las purgas de la torre hacia el sistema de tratamiento de aguas, y las pérdidas por evaporación originadas en el proceso de refrigeración del agua producido en la torre.

El sistema de refrigeración también hace la función de limpieza de tubos del condensador, cuya función será evitar problemas provocados por el ensuciamiento y formación de incrustaciones en los tubos. Alguno de estos problemas pueden ser: disminución de la transferencia de calor, aumento de la presión en el condensador con la consiguiente pérdida de rendimiento de la turbina, corrosión de los tubos y aumento de la pérdida de carga a través de los tubos.

2.4. Ciclo de agua/vapor (Ciclo Rankine)

En este punto hablaremos sobre el ciclo Rankine que se ha calculado para la planta de biomasa, en una primera aproximación para un Proyecto Básico.

Los principales equipos que incluirá el ciclo Rankine son:

- Caldera
- Turbina de vapor
- Condensador
- Bombas
- Desaireador-Precalentador

2.4.1. Descripción del ciclo / Análisis del ciclo

El ciclo cerrado de agua/vapor realizará los siguientes pasos a lo largo de la planta:


La biomasa ya tratada proveniente del sistema de tratamiento de biomasa es introducida en la caldera, donde su combustión proporciona la energía térmica necesaria para generar vapor sobrecalentado a las condiciones requeridas.

El vapor sobrecalentado es introducido en la turbina de vapor, donde se expansiona accionando el eje de la misma, acoplado a un generador eléctrico.

En una etapa de la turbina se realizará una extracción, que proporcionará la energía térmica al precalentador y al desgasificador, considerándolos un mismo equipo en este caso para simplificar.

El vapor a la salida de la turbina se condensa en el condensador acoplado a la salida de la misma.

El agua resultante del proceso de condensación será impulsada por las bombas de condensado, se hace pasar por el el precalentador desaireador.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Desde el desaireador-precalentador, las bombas de agua de alimentación impulsarán el agua hacia la caldera donde atravesará las distintas etapas de calentamiento (economizador, vaporizador, sobrecalentador...), para transformarse en vapor sobrecalentado.

2.4.1.1. Método

El método empleado se basa en los balances de masa y energía de los equipos más representativos del ciclo, además del uso de las tablas de propiedades del agua en diferentes estados, como son vapor sobrecalentado, líquido subenfriado, agua saturada (líquido-vapor).

Los valores más representativos de la planta son:

- Temperatura
- Caudal
- Entalpía
- Presión
- Rendimientos

2.4.1.2. Hipótesis de cálculo

- En la turbina: Expansión isoentrópica del vapor a través de la turbina desde vapor sobrecalentado hasta la presión del condensador.
- Condensador: Transferencia de calor entre el vapor de salida de la turbina con el agua de refrigeración, a presión constante, condensando todo el vapor hasta líquido saturado.
- Sistema de bombeo: Proceso incompresible e isoentropico, siendo su volumen específico invariable y asumiendo que el rozamiento del fluido es casi nulo, la variación de energía interna ha de ser nula. $\Delta u=0 \rightarrow -w_k=(p_2-p_1)v$
- Caldera: Aporte de calor al agua de circulación del ciclo Rankine a presión constante, hasta obtener vapor sobrecalentado.
- Las energías cinéticas y potenciales son despreciables
- La turbina y las bombas operan adiabáticamente.
- Para aplicar la ecuación de la energía, cada componente se considerará como un sistema independiente.
- Linealidad en la interpolación de la entropía y entalpía.
- No hay fugas en los diversos equipos de la planta.



2.4.1.3. Combustible

La planta de biomasa empleará como combustible eucalipto, para generar vapor sobrecalentado en la caldera, la caracterización del eucalipto, se realizará mediante el análisis elemental, para obtener el poder calorífico inferior a una cierta humedad.

Análisis elemental en base seca.

Los valores estimados en carbono, hidrogeno, oxigeno y azufre de los eucaliptos son los siguientes:

Análisis elemental				
	C	H	S	O
Eucalipto	49.88%	6,0	0,021	44,874

Tabla 15: Análisis elemental[12]

El poder calorífico superior del eucalipto sin humedad es:

$$PCS_0 = 4726.8 \text{ kcal/kg}$$

A continuación calcularemos el poder calorífico inferior sin humedad mediante la fórmula de Dulong y Petitcitado por Kollmann.

$$PCI_0 = 8100 \cdot C + 34000 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 2500 \cdot S$$

$PCI_0 = \text{PoderCalorificoInferior sin humedad}$


C, H, O, S = Tanto por uno en masa de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre.

$$PCI_0 = 4210.8 \text{ kcal/kg}$$

Luego calcularemos el poder calorífico inferior a una cierta humedad que dependerá de la procedencia de la biomasa, ya que toda la demanda de biomasa de la planta se abastecerá de biomasa de la zona, la biomasa contará con un valor alto de humedad debido al clima de A Coruña. Por ello, la humedad estimada para el cálculo del poder calorífico inferior será un 45%.

Se empleará la fórmula de Elvira y Marcos, dicha fórmula es aproximada en la obtención del poder calorífico a una cierta humedad, pero se tomará como válida.

$$PCI_H = PCS_0 \cdot (1 - H) - A(0.54 + 0.46 \cdot H)$$

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

H =humedad medida en base húmeda.

$PCI_H = \text{Poder calorífico inferior a una humedad } H$

$A = \text{Coeficiente con valor entre } 582 - 665 \text{ kcal/kg}$

El coeficiente A se ha considerado $A = 582 \text{ kcal/kg}$

Finalmente el valor del poder calorífico inferior a la humedad del 45 % es:

$$PCI_{45\%} = 2164.98 \text{ kcal/kg}$$

2.4.1.4. Bases de diseño

Para poder realizar los cálculos del ciclo de potencia es necesario imponer unos valores de diseño, estos valores podrán ser debido a leyes o normativas, requerimientos de equipos o la experiencia.

- El principal valor de diseño, es la elección de la potencia máxima de la planta de biomasa, en nuestro caso al encontrarse en la Comunidad Autónoma de Galicia, deberemos cumplir el Real Decreto 149/2008, de 26 de junio, CAPITULO II, Artículo 6: por el que se regula el procedimiento de autorización de las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de la valorización energética de la biomasa forestal primaria en la Comunidad Autónoma de Galicia. La potencia máxima de la central serán 10 MW.
- Temperatura y presión de diseño de la caldera. Todos los valores de la planta se calcularán a partir de los valores de diseño de la caldera. Los valores de diseño de la caldera no podrán superar los límites establecidos por los fabricantes. Temperatura d diseño 500 °C y presión de diseño 80 bar
- Combustible principal de la planta. La planta empleará biomasa forestal procedente de cultivos energéticos de eucalipto, cuyas características se han detallado anteriormente.
- Determinación de las horas de funcionamiento de la planta. Se establece en un 89% aproximadamente el porcentaje del tiempo en el cual la planta se encuentra disponible, para su normal operación. Este porcentaje tiene en cuenta tanto las paradas programadas establecidas para las labores de mantenimiento de la planta como aquellas paradas forzosas debido a causas ineludibles. Esta disponibilidad supone un balance de al menos 7.800 horas de funcionamiento al año.



- Rendimiento en la turbina. Las diversas pérdidas en la turbina son debidas a la fricción, la energía cinética de salida, necesaria para que el vapor a la salida tenga una cierta velocidad para salir de la turbina, fugas entre alabes y carcasa y fugas por el eje. El rendimiento total para la turbina se ha estimado en un 87 %, es una estimación entre los valores encontrados en documentación y los rendimientos estimados por fabricantes.
- Título a la salida de la turbina de vapor. El título no podrá superar el valor de un 15 %, por motivos de erosión en los alabes de la turbina provocada por las gotas en vapor a la salida de la turbina
- Rendimiento en la caldera. Las diversas pérdidas en la caldera son debidas a la pérdida de calor de los distintos equipos. El rendimiento total para la caldera se ha estimado en un 87 %, es una estimación entre los valores típicos de rendimiento en calderas y los rendimientos estimados por fabricantes.
- Rendimiento en las bombas. Las diversas pérdidas son debidas a la fricción de los elementos de las bombas, así como la fricción con el propio fluido. El rendimiento total para las bombas se ha estimado en un 87 %, es una estimación entre los valores típicos de rendimiento en bombas y los rendimientos estimados por fabricantes.
- Salto de temperatura del agua de refrigeración del circuito de la torre de refrigeración será necesario para saber cuánta agua debe estar circulando por el circuito, se ha estimado un valor de 5 °C.
- Presión de la extracción. La presión de extracción se ha estimado a 15 bar.
- Presión del condensador. La presión del condensador debe ser inferior a la atmosférica, ya que tenemos una turbina de condensación, una presión típica es de 0,08 bar.



2.4.1.5. Cálculos

A continuación desarrollaremos los cálculos del ciclo de Rankine mediante el método y las estimaciones anteriormente mencionadas

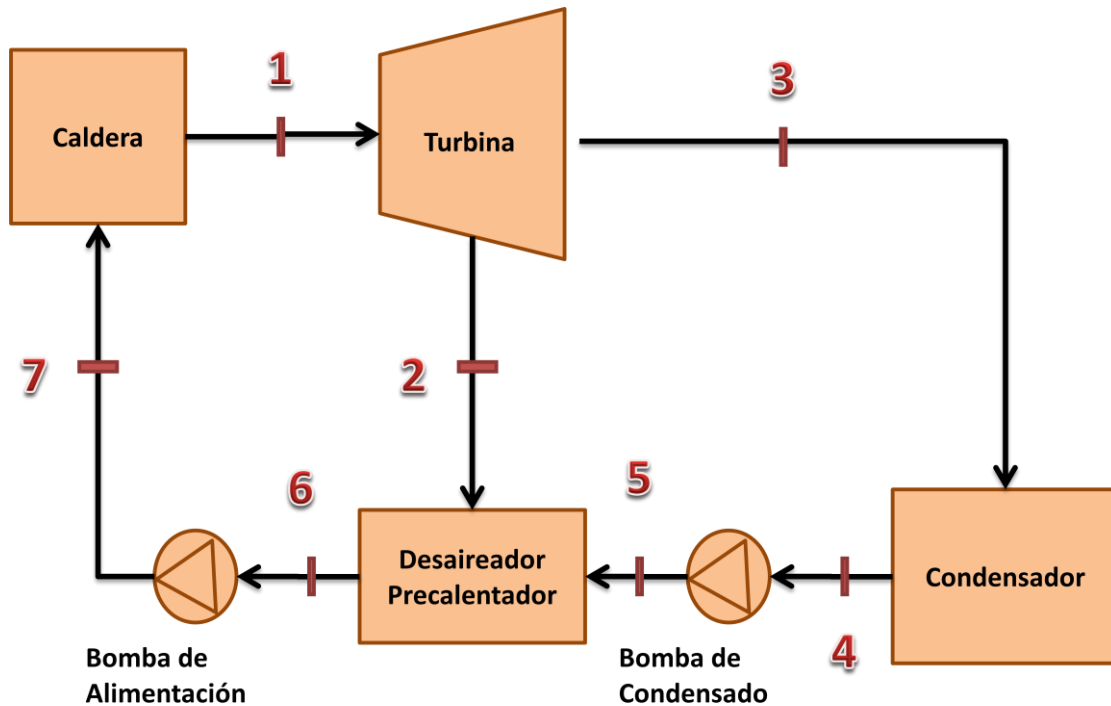


Figura 29: Ciclo Rankine con una extracción

El punto de partida para el cálculo del ciclo de Rankine es el punto 1, ya que es el único punto del ciclo del que conocemos datos, ya que los hemos impuesto como valores de diseño iniciales.

Punto 1

El punto 1 es la salida de la caldera y la entrada de la turbina de vapor, el fluido en este punto es vapor sobrecalentado.

Sabiendo la temperatura y la presión podemos calcular los valores de entalpía y entropía en este punto, mediante interpolación en tablas de vapor sobrecalentado.

$$T_1 = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_1 = 80 \text{ bar}$$



T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 80 \text{ bar} = 8,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 295.06^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432
320	0.02682	2662.7	2877.2	5.9489
360	0.03089	2772.7	3019.8	6.1819
400	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634
440	0.03742	2946.7	3246.1	6.5190
480	0.04034	3025.7	3348.4	6.6586
520	0.04313	3102.7	3447.7	6.7871
560	0.04582	3178.7	3545.3	6.9072
600	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206
640	0.05102	3330.1	3738.3	7.1283
700	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812
740	0.05729	3520.4	3978.7	7.3782

Tabla 16 Interpolación entre 480°C y 520°C

Interpolamos entre las temperaturas 480 °C y 520 °C

$$h_a = 3348.4 \text{ kJ/kg} \quad T_a = 480^\circ\text{C} \quad s_a = 6.6586 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$h_b = 3447.7 \text{ kJ/kg} \quad T_b = 520^\circ\text{C} \quad s_b = 6.7871 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\frac{s_1 - s_a}{T_1 - T_a} = \frac{s_b - s_a}{T_b - T_a} \quad ; \quad \frac{h_1 - h_a}{T_1 - T_a} = \frac{h_b - h_a}{T_b - T_a}$$

$$h_1 = 3398.05 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 6.72285 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$



Punto 2

El punto 2 representa la extracción de la turbina de vapor. En este punto consideraremos que el fluido es vapor sobrecalentado, pendientes de verificar su estado cuando sepamos su entropía. (*)

Los valores que conocemos en este punto son la presión, ya que viene definida por el diseño que hemos considerado.

$$P_2 = 15 \text{ bar}$$

La entropía del punto 2 también es conocida, si consideramos un proceso de entropía constante (isoentrópico).

$$s_{2s} = s_1 = 6.72285 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

(*) Demostración de que el punto 2 es 100 % vapor sobrecalentado.

Para que el punto 2 sea vapor sobrecalentado 100%, su entropía debe ser superior a la entropía de vapor saturado a la misma presión.

$$s_{2s} = 6.72285 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} > s_{\text{sat}(15\text{bar})} = 6.4448 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Sabiendo la entropía y la presión podemos calcular los valores de entalpía ideal y la entalpía real, considerando un rendimiento de la turbina, mediante interpolación en tablas de vapor sobrecalentado.

v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 15.0 \text{ bar} = 1.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 198.32^\circ\text{C}$)			
0.1318	2594.5	2792.2	6.4448
0.1325	2598.1	2796.8	6.4546
0.1483	2676.9	2899.3	6.6628
0.1627	2748.6	2992.7	6.8381
0.1765	2817.1	3081.9	6.9938
0.1899	2884.4	3169.2	7.1363
0.2030	2951.3	3255.8	7.2690
0.2160	3018.5	3342.5	7.3940
0.2352	3120.3	3473.1	7.5698
0.2478	3189.1	3560.9	7.6805
0.2668	3293.9	3694.0	7.8385
0.2793	3364.8	3783.8	7.9391

Tabla 17 Interpolación entre 2.899,3 kJ/kg y 2.992,7 kJ/kg



$$h_a = 28899.3 \text{ kJ/kg} \quad s_a = 6.6628 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$h_b = 2992.7 \text{ kJ/kg} \quad s_b = 6.8381 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$\frac{h_{2s} - h_a}{s_{2s} - s_a} = \frac{h_b - h_a}{s_b - s_a}$$

Entalpía ideal

$$h_{2s} = 2931.3 \text{ kJ/kg}$$

Para el cálculo de la entalpía real, consideraremos un rendimiento de turbina del 87 %

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = 0.87$$
$$h_2 = 2991.97 \text{ kJ/kg}$$

Punto 3

El punto 3 constituye la salida de la turbina de vapor, el fluido en este punto es vapor, aunque no al 100 %, sino que habrá una fracción de líquido. Esta fracción no podrá superar el 15%, como se menciona en los puntos anteriores, por motivos de erosión en los álabes de la turbina.

Los valores que conocemos en este punto son la presión, la cual viene definida por el diseño que hemos considerado.

$$P_3 = 0.08 \text{ bar}$$

La entropía del punto 3 también es posible conocerla, si consideramos un proceso de entropía constante (isoentrópico).

$$s_{3s} = s_2$$



La entropía real del punto 2 la podemos calcular partiendo de los valores ya obtenidos, mediante la interpolación de la entalpía real.

v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 15.0 \text{ bar} = 1.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 198.32^\circ\text{C}$)			
0.1318	2594.5	2792.2	6.4448
0.1325	2598.1	2796.8	6.4546
0.1483	2676.9	2899.3	6.6628
0.1627	2748.6	2992.7	6.8381
0.1765	2817.1	3081.9	6.9938
0.1899	2884.4	3169.2	7.1363
0.2030	2951.3	3255.8	7.2690
0.2160	3018.5	3342.5	7.3940
0.2352	3120.3	3473.1	7.5698
0.2478	3189.1	3560.9	7.6805
0.2668	3293.9	3694.0	7.8385
0.2793	3364.8	3783.8	7.9391

Tabla 17 Interpolación entre 2.899,3 kJ/kg y 2.992,7 kJ/kg

$$h_a = 28899.3 \text{ kJ/kg} \quad s_a = 6.6628 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$h_b = 2992.7 \text{ kJ/kg} \quad s_b = 6.8381 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$\frac{s_b - s_a}{h_b - h_a} = \frac{s_2 - s_a}{h_2 - h_a}$$

$$s_2 = 6.8367 \text{ kJ/kg} \cdot K = s_{3s}$$

Ahora comprobaremos la fracción de líquido que hay en el vapor, mediante las tablas de agua saturada (líquido-vapor), para verificar que no sobrepasa el 15 %.

$$s_{3s} = s_{\text{vap}} \cdot x + (1 - x) \cdot s_{\text{liq}}$$

$$6.8367 = 8.2287 \cdot x + (1 - x) \cdot 0.5926$$

$$x = 0.8177$$



La fracción de vapor en la mezcla es de aproximadamente del 82 %, lo que nos indica que la fracción de líquido es un 18%, valor bastante elevado. Aunque cabría destacar que estos valores son los obtenidos en la expansión isoentrópica, el caso real tendrá título inferior.

De esta misma forma podemos calcular la entalpía ideal del punto 3.

$$h_{3s} = h_{vap} \cdot x + (1 - x) \cdot h_{liq}$$
$$h_{3s} = 2577 \cdot x + (1 - x) \cdot 173.88$$

$$h_{3s} = 2119.07 \text{ kJ/kg}$$

Para el cálculo de la entalpía real, consideraremos un rendimiento de turbina del 87 %

$$\eta = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}} = 0.87$$
$$h_3 = 2232.54 \text{ kJ/kg}$$

Tenido ya el valor de entalpía real, podemos calcular el título real a la salida de la turbina.

$$h_3 = h_{vap} \cdot x + (1 - x) \cdot h_{liq}$$
$$x = 0.86$$

Finalmente la fracción de vapor en la mezcla es aproximadamente del 86 %, lo que nos indica que la fracción de líquido es un 14%, valor que, aunque elevado, queda dentro de los límites antes mencionados.

Punto 4

El punto 4 simboliza la salida del condensador, el fluido en este punto es líquido saturado.

En este punto conocemos la presión como único valor, ya que viene definida por el diseño que hemos considerado.

$$P_4 = 0.08 \text{ bar}$$



La entalpía y la entropía se podrán obtener directamente de las tablas de agua saturada (líquido-vapor).

$$h_4 = 173.88 \text{ kJ/kg} \quad s_4 = 0.5926 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

Punto 5

El punto 5 es la salida de la bomba de condensado. El fluido en este punto se considera incompresible, siendo su volumen específico invariable. Gracias a esta hipótesis, podemos calcular el valor del volumen específico para este punto, calculando el volumen específico del punto anterior.

De este modo, el volumen específico del punto 4, se obtiene de las tablas de agua saturada (líquido-vapor)

$$v_4 = 1.0084 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} = v_5$$

Otro valor que conocemos en este punto es la presión, ya que viene definida por el diseño que hemos considerado.

$$P_5 = 15 \text{ bar}$$

La entropía del punto 5 también es posible conocerla, si consideramos un proceso de entropía constante (isoentrópico).

$$s_{5s} = s_4$$

La entalpía ideal del punto 5 la podemos calcular mediante la aproximación de proceso incompresible y asumiendo que el rozamiento del fluido es casi nulo, lo que ocasiona que la variación de energía interna sea nula.

$$\Delta u = 0$$

$$\Delta h = v \cdot \Delta p$$

$$h_{5s} - h_4 = v_4 \cdot (P_5 - P_4)$$

$$h_{5s} = 175.38 \text{ kJ/kg}$$



Para el cálculo de la entalpía real, consideraremos un rendimiento de la bomba del 87 %

$$\eta = \frac{h_{5s} - h_4}{h_5 - h_4} = 0.87$$

$$h_5 = 175.61 \text{ kJ/kg}$$

Punto 6

El punto 6 representa la salida del precalentador-desaireador, el fluido en este punto es líquido saturado.

El valor que conocemos en este punto es la presión, ya que viene definida por el diseño que hemos considerado.

$$P_6 = 15 \text{ bar}$$

La entalpía y la entropía se podrán obtener directamente de las tablas de agua saturada (líquido-vapor).

$$h_6 = 844.84 \text{ kJ/kg} \quad s_6 = 2.315 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

Punto 7

El punto 7 constituye la salida de la bomba de alimentación. El fluido en este punto ha sufrido una compresión isoentrópica, por lo que conocemos su entropía.

$$s_{7s} = s_6$$

Otro valor que conocemos en este punto es la presión, al venir definida por el diseño que hemos considerado.

$$P_7 = 80 \text{ bar}$$



La entalpía ideal del punto 7 la podemos calcular mediante doble interpolación, con las tablas de líquido subenfriado.

Realizaremos doble interpolación con las tablas de $P_I = 75 \text{ bar}$ y $P_{II} = 100 \text{ bar}$

- Interpolación I

$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 75 \text{ bar} = 7.5 \text{ MPa}$ ($T_{sat} = 290.59^\circ\text{C}$)			
.9984	83.50	90.99	.2950
1.0045	166.64	174.18	.5696
1.0256	333.15	340.84	1.0704
1.0397	416.81	424.62	1.3011
1.0752	585.72	593.78	1.7317
1.1219	758.13	766.55	2.1308
1.1835	936.2	945.1	2.5083
1.2696	1124.4	1134.0	2.8763
1.3677	1282.0	1292.2	3.1649

Tabla 18 Interpolación entre 766,55 kJ/kg y 945,1 kJ/kg

$$h_a = 766.55 \text{ kJ/kg} \quad s_a = 2.1308 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$h_b = 945.1 \text{ kJ/kg} \quad s_b = 2.5083 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\frac{h_b - h_{I,7s}}{s_b - s_{I,7s}} = \frac{h_b - h_a}{s_b - s_a}$$

$$h_{I,7s} = 853.67 \text{ kJ/kg}$$



- Interpolación II

$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$)			
.9972	83.36	93.33	.2945
1.0034	166.35	176.38	.5686
1.0245	332.59	342.83	1.0688
1.0385	416.12	426.50	1.2992
1.0737	584.68	595.42	1.7292
1.1199	756.65	767.84	2.1275
1.1805	934.1	945.9	2.5039
1.2645	1121.1	1133.7	2.8699
1.4524	1393.0	1407.6	3.3596

Tabla 19 Interpolación entre 767,84 kJ/kg y 945,9, kJ/kg

$$h_a = 767.84 \text{ kJ/kg} \quad s_a = 2.1275 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$h_b = 945.9 \text{ kJ/kg} \quad s_b = 2.5039 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$\frac{h_b - h_{II,7s}}{s_b - s_{II,7s}} = \frac{h_b - h_a}{s_b - s_a}$$

$$h_{II,7s} = 856.54 \text{ kJ/kg}$$

Interpolando entre los dos resultados.

$$\frac{h_{II,7s} - h_{I,7s}}{s_{II,7s} - s_{I,7s}} = \frac{h_{7s} - h_{I,7s}}{s_{7s} - s_{I,7s}}$$

$$h_{7s} = 854.24 \text{ kJ/kg}$$



Para el cálculo de la entalpía real, consideraremos un rendimiento de la bomba del 87 %

$$\eta = \frac{h_{7s} - h_6}{h_7 - h_6} = 0.87$$

$$h_7 = 855.65 \text{ kJ/kg}$$

Balance de masa entre los puntos 2-5-6

Mediante el balance de masa de la planta calcularemos la fracción “y” que sale de la turbina y va al precalentador-desaireador.

El desaireador tiene la función de eliminar los gases no condensables (oxígeno y CO₂) mediante el calentamiento del agua, que se empleará en la alimentación de la caldera, evitando así la corrosión de los equipos.

La función del precalentador es la de elevar la temperatura de la corriente de alimentación de agua que sale del desaireador y llega a la caldera, mejorando el rendimiento del ciclo de agua-vapor de la planta de biomasa.

Considerando el caso estacionario, y que no hay ni fugas ni aportes de agua al ciclo, obtenemos:

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

Si aplicamos esta fórmula al conjunto desaireador-precalentador.

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

Desconocemos todos los caudales, por lo que deberemos recurrir a los datos conocidos y calculados anteriormente.

Balance de energía entre los puntos 2-5-6

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{C_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) - \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{C_s^2}{2} + g \cdot z_s \right)$$

Estamos en estado estacionario: $\frac{dE_{VC}}{dt} = 0$

Sin aporte de calor ni potencia: $\dot{Q} = 0$; $\dot{W} = 0$



No hay influencia de la energía cinética y potencial: $\frac{c_i^2}{2} = 0$; $g \cdot z_i = 0$

La ecuación queda finalmente.

$$0 = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{m}_6 \cdot h_6$$

Llamaremos “y” a la fracción de vapor extraído de la turbina de vapor, y será:

$$y = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_6}$$

Introduciendo esta variable en la ecuación y despejándola, podemos obtener el valor de la fracción de vapor extraído:

$$0 = y \cdot h_2 + (1 - y) \cdot h_5 - 1 \cdot h_6$$

$$y = 0.237$$

Balances de energía en la turbina

La turbina de vapor es el elemento encargado de recibir el vapor sobrecalentado procedente de la caldera y expansionarlo hasta que este alcanza las condiciones establecidas en el condensador, que se encuentra a la salida de la misma. La turbina cuenta con un acoplamiento mediante reductora para accionar el generador.

La turbina de vapor es una máquina de fluido en la que la energía contenida en el vapor sobrecalentado generado en la caldera, produce el movimiento del eje del turbogruppo suponiendo que a la salida de la turbina, el vapor contenga menor cantidad de energía.

La energía que acciona el eje del turbogruppo procede tanto de la energía mecánica contenida en la corriente de vapor como de la energía térmica disponible en el fluido, transformada en energía mecánica debido al proceso de expansión al que se le somete en el seno de la turbina.

La energía mecánica inducida en el eje supondrá el accionamiento del generador eléctrico.

La turbina que se empleará en la planta de biomasa será una turbina de condensación, (ya que a la salida de la turbina se encontrará un condensador en el que las condiciones se encuentran por debajo de las atmosféricas, $P_{\text{condensación}} = 0,08$ bar) con una extracción intermedia de vapor para el precalentamiento del agua de alimentación, con objeto de incrementar el rendimiento del ciclo Rankine de agua-vapor en que se basa el ciclo térmico de esta central.

Mediante la aplicación del balance de energía en la turbina y las condiciones de diseño, podemos obtener la masa de vapor que circula por la planta. (\dot{m}_6)



$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{C_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) - \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{C_s^2}{2} + g \cdot z_s \right)$$

Estamos en estado estacionario: $\frac{dE_{VC}}{dt} = 0$

Sin aporte de calor: $\dot{Q} = 0$

No hay influencia de la energía cinética y potencial: $\frac{C_i^2}{2} = 0$; $g \cdot z_i = 0$

$$\dot{W} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) + \dot{m}_5 \cdot (h_2 - h_3)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 \quad y = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_6} \quad \dot{m}_5 = (1 - y) \dot{m}_6$$

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}_6} = 1 \cdot (h_1 - h_2) + (1 - y) \cdot (h_2 - h_3) = 906.05 \text{ kW}$$

Por diseño sabemos que la potencia nominal de la turbina es $\dot{W} = 10 \text{ MW}$, por lo que la masa que circula por el ciclo es:

$$\dot{m}_6 = 10.15 \text{ kg/seg} = 36.5 \text{ t/h}$$

Balances de energía en el condensador

El condensador, más utilizado para la potencia de la planta, es de tipo superficie, concretamente de carcasa-tubos, con distribución en contracorriente, por lo que la entrada del vapor y el agua de refrigeración proveniente de la torre entrarán por los extremos opuestos del intercambiador, fluyendo en direcciones opuestas.

El condensador recoge el vapor a la descarga de la turbina de vapor, transfiriendo el calor latente del vapor al agua de circulación y preparando el agua para ser impulsada por las bombas de condensado. La refrigeración del condensador se realiza mediante torres de refrigeración húmeda de flujo en contracorriente, que absorben el calor de condensación del vapor recogiendo, en fase líquida, en el pozo del condensador.

Este intercambiador de calor está diseñado para condensar todo el vapor procedente de la turbina de vapor en cualquier condición de operación.

Mediante la aplicación del balance de energía en el condensador y las condiciones de diseño, podemos obtener el calor que deberá evacuar el sistema de refrigeración. Así calcularemos el caudal de agua necesario para el circuito de refrigeración de la planta.



$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{C_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) - \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{C_s^2}{2} + g \cdot z_s \right)$$

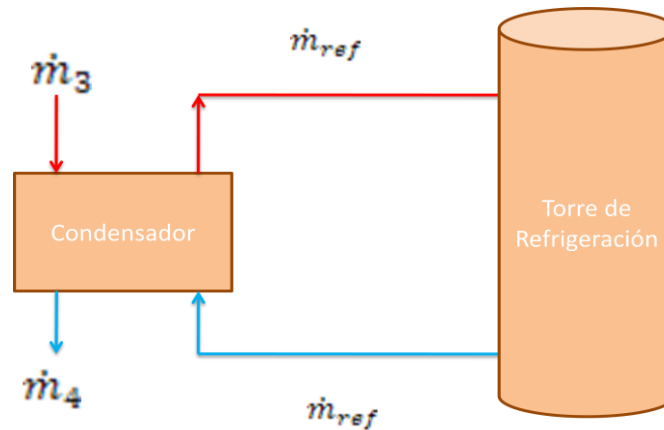


Figura 30: Balance de energía en el condensador

Estamos en estado estacionario: $\frac{dE_{VC}}{dt} = 0$

Sin aporte de potencia: $\dot{W} = 0$

No hay influencia de la energía cinética y potencial: $\frac{C_i^2}{2} = 0$; $g \cdot z_i = 0$

Por balance de masas: $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_4) = 15943.2 \text{ kW}$$

Sabemos que el salto de temperaturas en el condensador para el agua del circuito de refrigeración es de 5 °C

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m}_{ref} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Por lo que el caudal de agua de refrigeración es:

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{Q}_{ref}}{C_p \cdot \Delta T} = 762,83 \text{ kg/seg}$$

Las pérdidas de agua de la torre pueden deberse a la evaporación del agua dentro de la torre y al arrastre de gotas.



Teniendo el caudal de agua de refrigeración del circuito de la torre, podemos calcular el agua necesaria para reponer las pérdidas en la torre.

Las pérdidas de agua por evaporación son:

$$\dot{m}_{evap} = \frac{\dot{Q}_{ref}}{C_v}$$

C_v = Calor de evaporación del agua y su valor es 2550 kJ/kg

El caudal perdido por evaporación es:

$$\dot{m}_{evap} = 6,25 \text{ kg/seg} = 22,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Las pérdidas de agua por arrastre son:

$$\dot{m}_{arraastre} = K \cdot \dot{m}_{ref}$$

Donde “K” es el coeficiente de arrastre de agua en la torre, el cual oscila entre 0,05% (límite autorizado por el R.D. 865/2003 de eficacia de separadores) y 0,01 % (valor de los actuales separadores). $K = 0,01\%$

$$\dot{m}_{arraastre} = 0,076 \text{ kg/seg} = 0,27 \text{ m}^3/\text{h}$$

La pérdida total de agua que será necesario reponer al circuito de refrigeración de la torre es la suma de las pérdidas debidas a la evaporación y el arrastre.

$$\dot{m}_{perdidaTotal} = \dot{m}_{arraastre} + \dot{m}_{evap} = 22,77 \text{ m}^3/\text{h}$$

La pérdida total es mayoritariamente debida a la evaporación, ya que las pérdidas por arrastre normalmente se encuentran en torno a 20 o 100 veces inferior a las pérdidas por evaporación.

$$\frac{\dot{m}_{evap}}{\dot{m}_{arraastre}} = 83,33$$

Balance de energía en las bombas

La planta de biomasa cuenta con dos sistemas de bombas en el ciclo Rankine para hacer circular el agua y el vapor, estos sistemas son:

- Bombas de extracción de condensado:



Las bombas de extracción de condensado aspiran del condensador el agua condensada y la envían al sistema desaireador-precalentador.

- Bombas de agua de alimentación

Las bombas de agua de alimentación impulsan el agua desde el desaireador-precalentador hasta la caldera.

Mediante el uso de los balances de energía de las bombas, obtendremos sus consumos.

- Bombas de extracción de condensado:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{C_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) - \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{C_s^2}{2} + g \cdot z_s \right)$$

Estamos en estado estacionario: $\frac{dE_{VC}}{dt} = 0$

Sin aporte de calor: $\dot{Q} = 0$

No hay influencia de la energía cinética y potencial: $\frac{C_i^2}{2} = 0$; $g \cdot z_i = 0$

Por balance de masas: $\dot{m}_5 = \dot{m}_4$

$$\dot{W}_{b,cond} = \dot{m}_4 \cdot (h_5 - h_4) = 13,4 \text{ kW}$$

- Bombas de agua de alimentación

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{C_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) - \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{C_s^2}{2} + g \cdot z_s \right)$$

Estamos en estado estacionario: $\frac{dE_{VC}}{dt} = 0$

Sin aporte de calor: $\dot{Q} = 0$

No hay influencia de la energía cinética y potencial: $\frac{C_i^2}{2} = 0$; $g \cdot z_i = 0$

Por balance de masas: $\dot{m}_7 = \dot{m}_6$

$$\dot{W}_{b,alim} = \dot{m}_6 \cdot (h_7 - h_6) = 136,42 \text{ kW}$$



Balance de energía en la caldera

La descripción de la caldera se desarrollará en el siguiente bloque III.

Gracias al balance de energía podemos obtener cuanta cantidad de biomasa es necesaria para abastecer a la planta.

Para calcular la masa de biomasa, necesitamos calcular antes el calor aportado por la citada biomasa al ciclo.

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{C_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) - \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{C_s^2}{2} + g \cdot z_s \right)$$

Estamos en estado estacionario: $\frac{dE_{VC}}{dt} = 0$

Sin aporte de trabajo: $\dot{W} = 0$

No hay influencia de la energía cinética y potencial: $\frac{C_i^2}{2} = 0$; $g \cdot z_i = 0$

Por balance de masas: $\dot{m}_7 = \dot{m}_1$

El calor aportado al ciclo por la combustión de la biomasa es:


$$\dot{Q}_c = \dot{m}_7 \cdot (h_1 - h_7) = 25,78 \text{ MW}$$

\dot{Q}_c es la cantidad de potencia que deberíamos generar al quemar la biomasa, aunque, como las calderas no tiene rendimientos del 100 %, la cantidad de potencia necesaria será mayor. Para ello, consideraremos un rendimiento en la caldera del 87%.

$$\frac{\dot{Q}_c}{0.87} = \dot{m}_{biomasa} \cdot PCI$$

$$\dot{m}_{biomasa,0} = \frac{\dot{Q}_c}{PCI \cdot 0.87} = 1,71 \text{ kg/seg}$$

$\dot{m}_{biomasa,0}$ Es la cantidad de biomasa necesaria para alimentar la caldera en el caso de que la biomasa no contenga humedad. La biomasa normalmente contiene un cierto porcentaje de humedad, por lo que el poder calorífico inferior se ve reducido y por consiguiente será necesaria mayor cantidad de biomasa. El poder calorífico inferior real de la biomasa será el calculado en el apartado 2.4.1.3 Combustible.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Dicho valor es:

$$PCI_{45\%} = 2164,98 \text{ kcal/kg}$$

La cantidad de biomasa con una humedad del 45 % es:

$$\dot{m}_{biomasa,45\%} = \frac{\dot{Q}_c}{PCI \cdot 0.87} = 3,28 \text{ kg/seg}$$

La cantidad de biomasa necesaria para abastecer a la planta anualmente, considerando que la planta funcionará 7.800 horas, es:

$$\dot{m}_{biomasa/anual} = 92.235 \text{ t/año}$$

Balance de aguas

Para el funcionamiento de la planta de biomasa, es necesario un cierto caudal de agua de entrada para alimentar a diversos elementos de la planta, estos elementos son:

- Torre de refrigeración
- Ciclo cerrado agua/vapor
- Elementos auxiliares

Torre de refrigeración

La torre de refrigeración necesita un caudal de agua, para reponer el agua perdida por evaporación y el arrastre (anteriormente calculadas) y las purgas de la torre de refrigeración.

La purga de la balsa de la torre es necesaria, para mantener un nivel de salinidad en el agua óptima. Por ello, se estima el caudal de purga de la torre en la mitad del agua evaporada y arrastrada en la torre.

$$\dot{m}_{Captación,torre} = \dot{m}_{perdidaTotal} + \dot{m}_{Purgas}$$

$$\dot{m}_{Purgas} = 11,38 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{m}_{Captación,torre} = 34,15 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ciclo cerrado agua/vapor

En el ciclo cerrado agua/vapor será necesario realizar purgas, ya que el agua dentro del ciclo debe mantener unas propiedades óptimas para un buen funcionamiento de la planta.



El caudal purgado es igual al caudal de reposición del ciclo, que a la vez ha tenido que pasar por todo el sistema de aguas para ser desmineralizada.

$$\dot{m}_{\text{Captación,Ciclo}} = 2,28 \text{ m}^3/\text{h}$$

Elementos auxiliares

La planta cuenta con diversos equipos o elementos que emplean agua para su funcionamiento, divididos en dos categorías según el agua empleada:

- Agua potable: es el agua necesaria para los empleados de la planta, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), actualmente se estima que el consumo humano ronda los 300 l/día, por lo que la necesidad de agua potable para una planta de 20 trabajadores sería:

$$\dot{m}_{\text{Captación,Potable}} = \frac{300/24}{1000} \cdot 20 = 0,25 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Agua de servicio: es el agua empleada en los sistemas de refrigeración secundarios, sistema de protección contra incendios, etc. Se estima que será necesario.

$$\dot{m}_{\text{Captación,Servicio}} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$$


2.4.1.6. Rendimientos

Teniendo ya todos los datos del ciclo de Rankine, vamos a presentar los rendimientos de la planta de biomasa.

El rendimiento del ciclo Rankine, se expresa como el cociente entre la potencia neta obtenida en el ciclo, (la potencia en bornes del generador menos las cargas principales del ciclo, las bombas de alimentación y las de condensado), entre el calor suministrado en la caldera de vapor.

Parámetros ciclo Rankine		
Rdto. Ciclo (%)	Wneto ciclo / Qcaldera	38,21
	(W _{tv} -W _c) (MW _e)	9,85
	Q caldera (MW _{th})	25,78

Tabla 20 Parámetros ciclo Rankine

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

El rendimiento de la caldera por su parte se define como la relación entre el calor suministrado en la caldera de vapor y la potencia calorífica contenida en el combustible introducido.

Parámetros caldera		
Rdto. Caldera (%)	$Q_{caldera} / [m(kg/s) \cdot PCI(kJ/kg)]$	87

Tabla 21 Parámetros caldera

A la hora de expresar la relación de eficiencia, entre la potencia neta obtenida en el ciclo Rankine con respecto a la potencia calorífica contenida en el combustible que se introduce en la caldera, se define el rendimiento global del ciclo, el cual tomando de referencia los rendimientos anteriormente descritos adquiriría un valor de:


Parámetros globales del ciclo			
Rdto. Global Ciclo (%)	$W_{neto\ ciclo} / [m \cdot PCI]$	$R_{toCiclo} \cdot R_{to\ Caldera}$	33,24

Tabla 22 Parámetros globales del ciclo

Por último, el rendimiento total de la planta de biomasa, se define como la relación existente entre la potencia neta de la central, es decir la potencia en bornes del generador menos todos los consumos auxiliares de la central y la potencia calorífica contenida en el combustible que se introduce en la caldera.

Para poder obtener este rendimiento, hace falta estimar los autoconsumos de la planta: El ciclo de potencia de esta planta presenta los autoconsumos típicos de una central convencional, a saber, bombeo de condensado, bombeo de agua de alimentación, bombeo de agua de circulación del circuito de agua de refrigeración, ventiladores de las torres de refrigeración húmeda y ventiladores de la caldera de vapor, además de todos los consumos de los múltiples sistemas auxiliares.

Teniendo en consideración todos los consumos eléctricos de la central asociados a la generación, se estima una potencia consumida de 944 kWe.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Se obtiene un rendimiento global de la planta de:

Parámetros de la planta		
Rdto. Central (%)	Wneto planta / [m·PCI]	30,56

Tabla 23 Parámetros de la planta

2.4.1.7. Resultados

A continuación se desglosan los parámetros fundamentales de funcionamiento de la planta de biomasa y se muestra el diagrama T-S completo del ciclo de agua/vapor, el diagrama completo de la planta y el diagrama de balance de aguas, con los valores de temperatura, entalpía, masa y presión de los puntos más importantes.

Parámetros fundamentales

Parámetros de planta	Ud.	Valor
Potencia bruta TV	MW	10
Consumos eléctricos asociados a generación	MW	0,944
Potencia neta	MW	9,056
Horas de funcionamiento de la central	h	7.800
Producción energética anual	GWh	70,64
PCI biomasa	(kcal/kg)	2.165
Rendimiento caldera	-	87%
Qcaldera	MWth	25,78
m biomasa	t/h	11,8
Consumo anual de biomasa	t/año	92.235
Potencia térmica anual	GWhth	229,09
Rdto. Ciclo (Wneto ciclo / Qcaldera)	-	38,21%
Rdto. Global Ciclo (Wneto ciclo / [m·PCI])	-	33,24%
Rdto. Central (Wneto planta / [m·PCI])	-	30,56%

Tabla 24 Resumen parámetros de la planta

Diagrama T-S

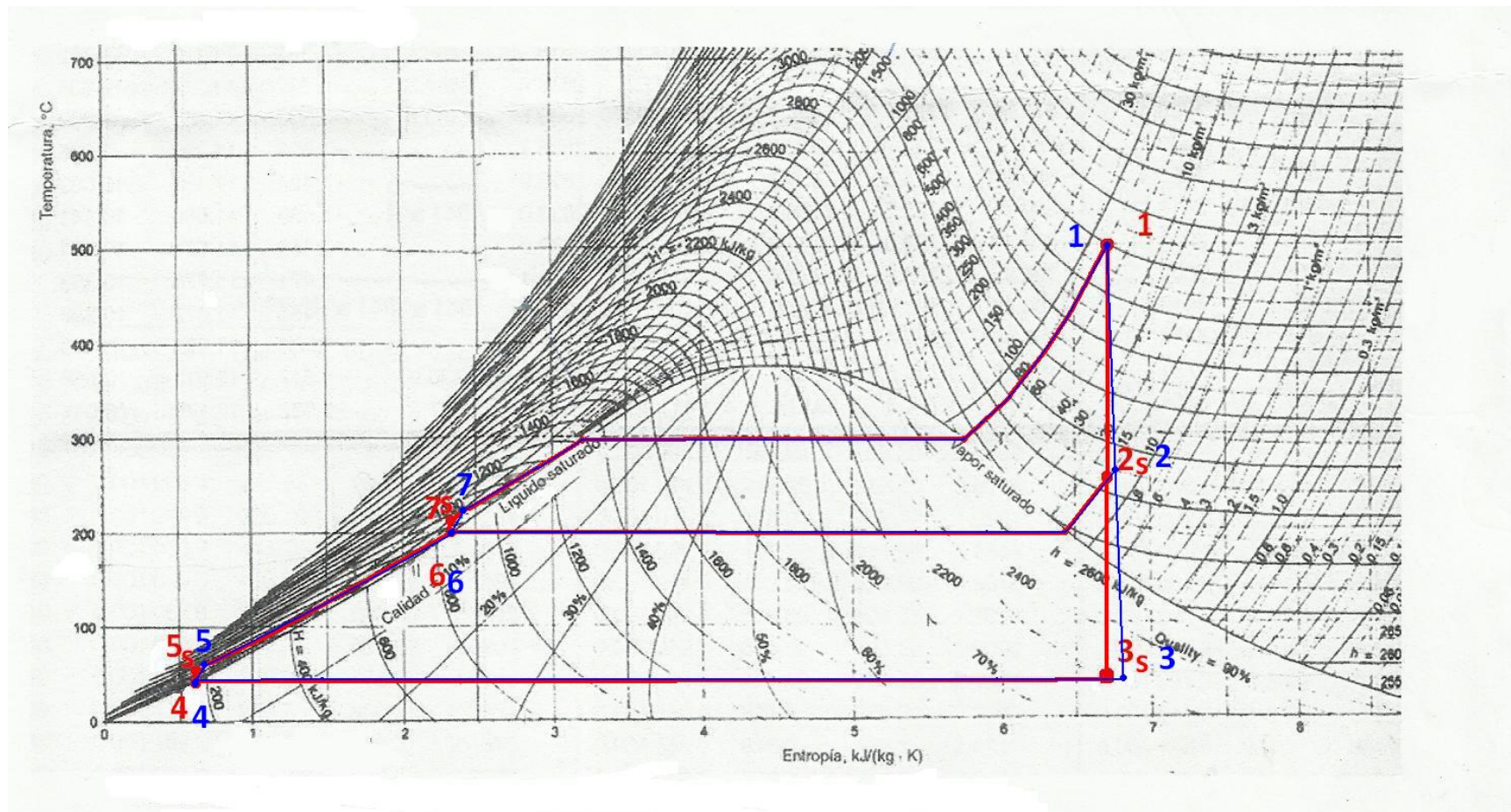


Figura 31: Diagrama T-S

Puntos del Ciclo Rankine	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Entropía (kJ/kgK)	Entalpía (kJ/kg)
1	500	80	6,72	3398,05
2	260	15	6,83	2991,97
3	41,51	0,08	7,16	2232,54
4	41,51	0,08	0,59	173,88
5	50	15	0,63	175,61
6	198,3	15	2,31	844,84
7	220	80	2,45	855,65
2s	250	15	6,72	2931,3
3s	41,51	0,08	6,83	2119,07
5s	45	15	0,59	175,61
7s	210	80	2,31	854,24

Tabla 25 Resumen puntos del diagrama T-S



Diagrama completo de toda la planta

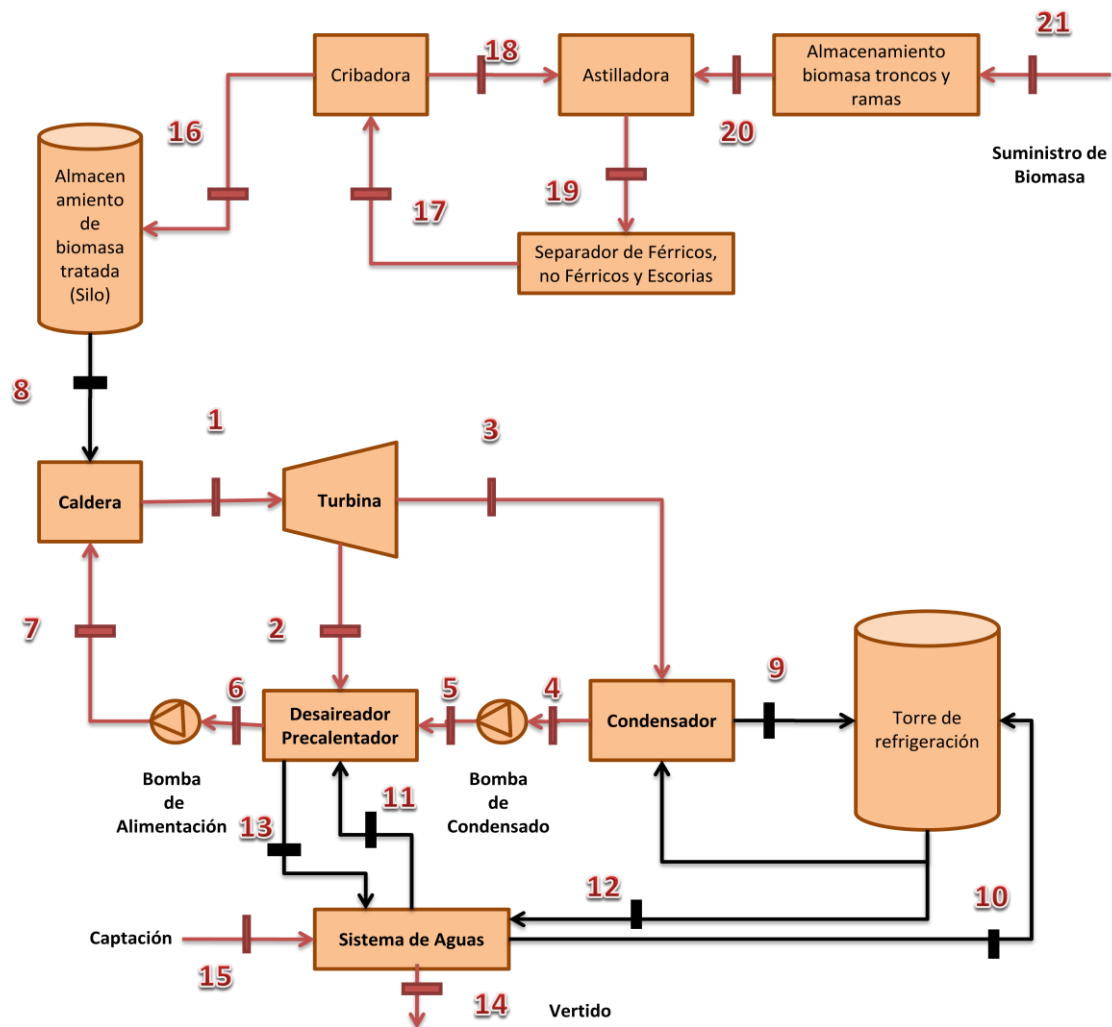


Figura 32: Diagrama completo de toda la planta

Puntos del Ciclo Rankine	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Masa (kg/seg)	Entalpía (kJ/kg)
1	500	80	10,15	3398,05
2	200	15	2,406	2991,97
3	45	0,08	7,744	2232,54
4	41,51	0,08	7,744	173,88
5	45	15	7,744	175,61
6	198,3	15	10,15	844,84
7	200	80	10,15	858,28

Tabla 26 Resumen puntos del ciclo Rankine



Puntos del Sistema de Biomasa	Masa (kg/seg)
8	3,28
16	4,125
17	4,167
18	0,042
19	4,167
20	4,125
21	1,71t/sem

Tabla 27 Resumen puntos del sistema de biomasa

Punto del Sistema de refrigeración	Masa (kg/seg)
9	762,83

Tabla 28 Punto del sistema de refrigeración

Puntos del Sistema de aguas	Masa (kg/seg)
10	9,49
11	0,63
12	3,16
13	0,63
14	4,13
15	10,46

Tabla 29 Resumen puntos del sistema de aguas



Diagrama del balance de aguas

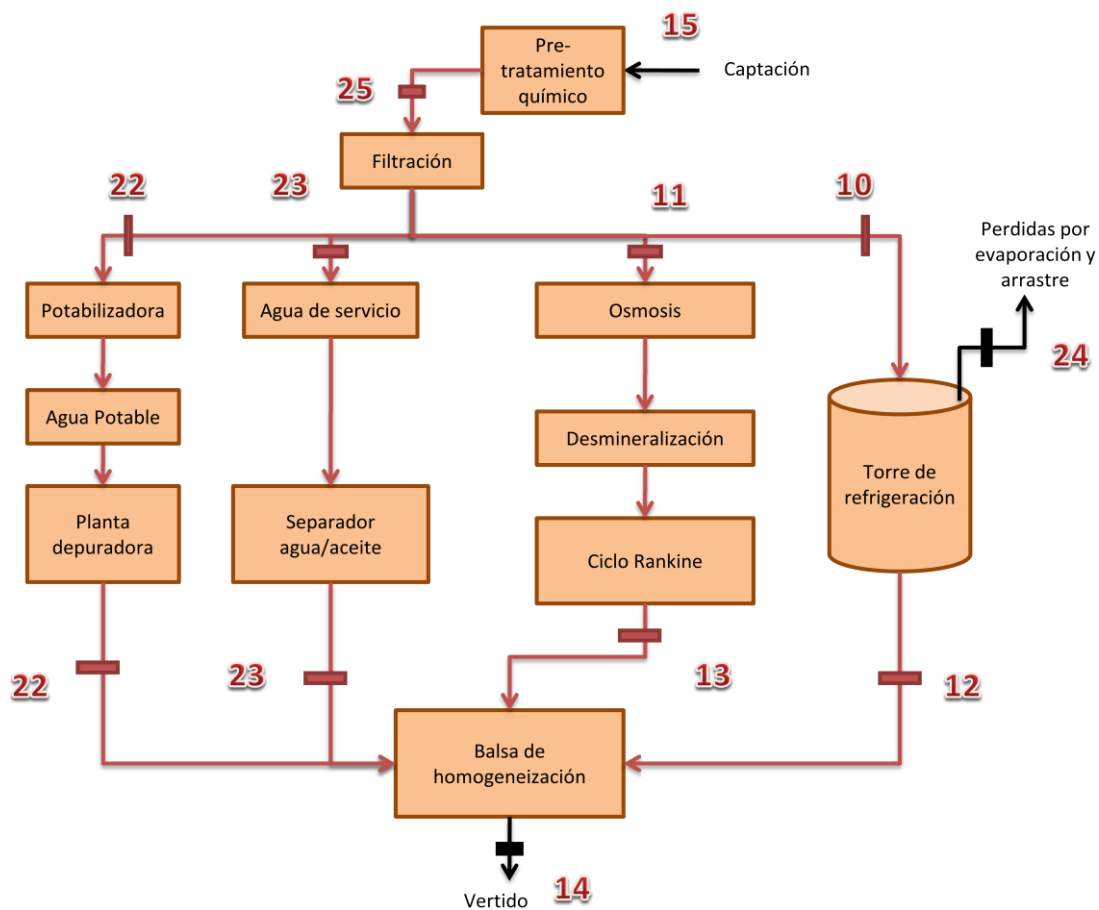


Figura 33: Diagrama del balance de aguas

Puntos del Sistema de aguas	Masa (kg/seg)
10	9,49
11	0,63
12	3,16
13	0,63
14	4,13
15	10,46
22	0,058
23	0,278
24	6,33
25	10,46

Tabla 30 Sistema de aguas



2.4.2. Discusión de resultados

Finalmente con los datos obtenidos anteriormente, comprobaremos si es viable el proyecto de una planta de biomasa en el municipio de Dubra, en la comunidad autónoma de Galicia.

La planta de biomasa cumplirá todas las normativas y Reales Decretos necesarios para su construcción, pero además de las normas y Reales Decretos, la planta deberá cumplir varias condiciones para su viabilidad medioambiental y económica. Estas condiciones son:

- Viable el consumo de agua
- Viable el vertido del agua
- Viable el consumo de biomasa
- Rendimientos razonables

Viabilidad en el consumo de agua

Para estudiar la viabilidad del consumo de agua de la planta, el abastecimiento de la planta deberá ser bastante inferior al caudal del río de captación, en este caso el río Dubra.

A continuación se muestran los caudales medios de cada mes entre octubre del 2009 y septiembre del 2010 del río Dubra. Estos valores han sido sacados de la estación de aforo del río Dubra, propiedad de Aguas de Galicia.

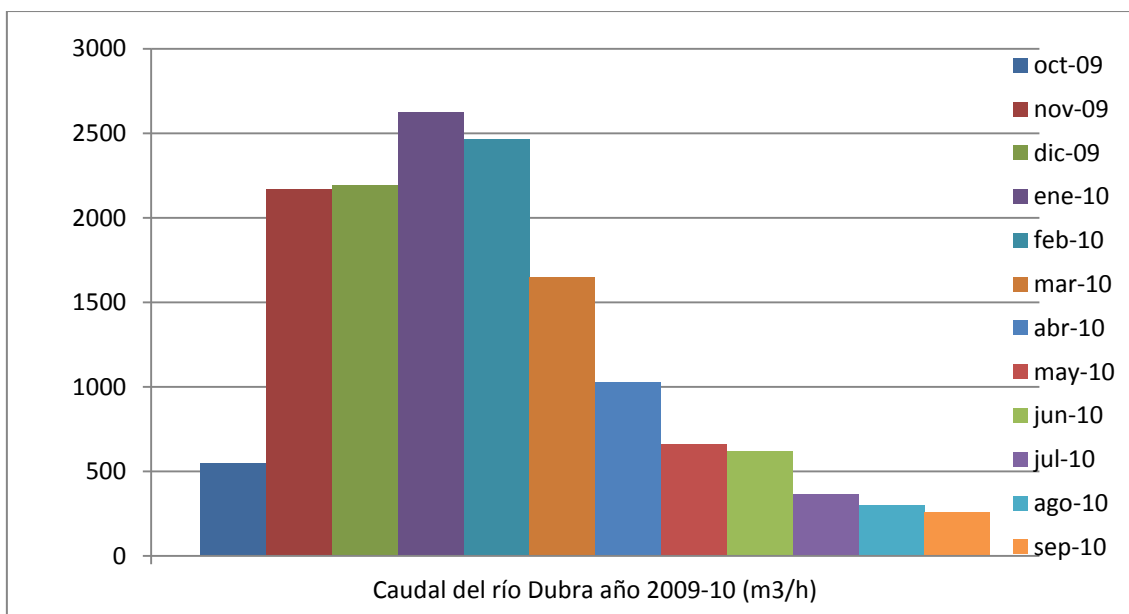



Figura 34: Caudal del río Dubra[7]

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Como era de esperar, los meses con mayor caudal son los meses enero y febrero, y los meses más secos agosto y septiembre.

El caudal que nos interesa más para nuestro estudio es el del mes de menor caudal del año, ya que será el mes más desfavorable para la captación y vertido de agua, con el fin de no provocar cambios significativos en la fauna y flora del río Dubra.

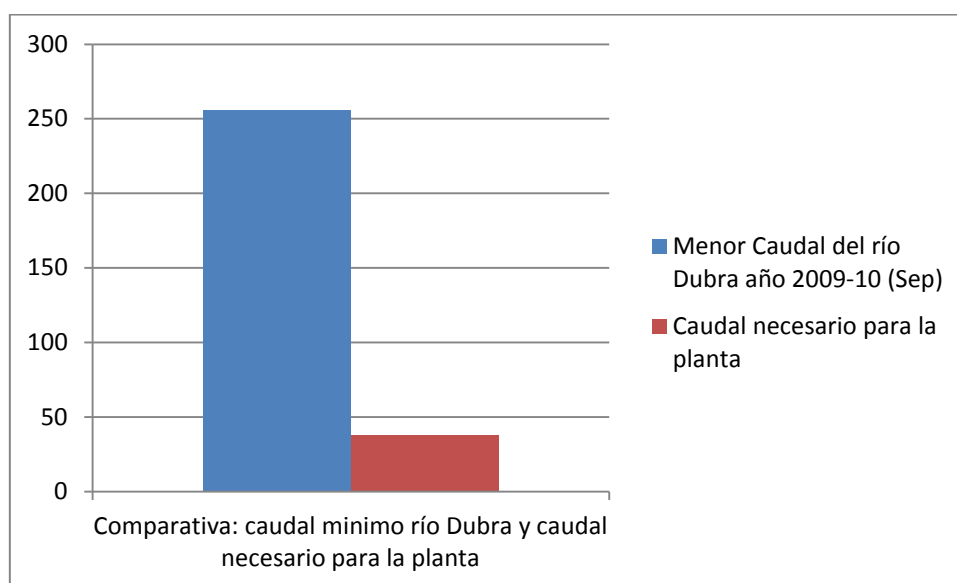


Figura 35: Comparación del caudal mínimo del río Dubra y el caudal necesario[7]


Como indica en la figura 34 el mes con menor caudal es el mes de septiembre con un valor de $255,66 \text{ m}^3/\text{h}$. El caudal necesario para abastecer todas las necesidades de la planta es $37,64 \text{ m}^3/\text{h}$.

El caudal de captación corresponde al 14,7% del caudal del río Dubra en el mes con menor caudal, por lo que podemos concluir, que la captación como el vertido de agua por parte de la planta de biomasa, no afectará significativamente a la fauna y flora del río Dubra.

Viabilidad del vertido de aguas

Para estudiar la viabilidad del vertido de aguas de la planta, calcularemos la diferencia de caudal existente entre el caudal de salida de la planta (vertido) y el caudal mínimo del río Dubra.

El caudal de vertido son $14,83 \text{ m}^3/\text{h}$ y el caudal mínimo del río Dubra son $255,66 \text{ m}^3/\text{h}$ perteneciente al mes de septiembre. Podemos observar que el vertido de aguas representa un

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

5,8 %, un porcentaje muy pequeño para llegar a producir un impacto en el ecosistema del río Dubra.

Viabilidad en el consumo de biomasa

Para estudiar la viabilidad del consumo de biomasa de la planta, el abastecimiento de este recurso en la planta deberá estar asegurado, aunque la planta cuente con varias zonas de almacenamiento de biomasa, tratada y sin tratar.

Los cultivos energéticos de eucalipto, pueden producir una media entre 17,5 y 30 toneladas de eucalipto por hectárea cultivada al año.

El número de hectáreas para abastecer totalmente a la planta de biomasa con eucalipto serán:

$$Hectareas = \frac{\dot{m}_{biomasa/anual}}{Rendimientodelabiomasa}$$

$$Hectareas = \frac{92.235 \text{ t/año}}{17,5 \text{ t/ha} \cdot \text{año}} = 5.270,6 \text{ ha}$$

Como era de esperar, no es suficiente con las hectáreas de eucalipto alrededor de la planta de biomasa, aunque el suministro estará asegurado si observamos las hectáreas dedicadas exclusivamente al eucalipto solo en A Coruña.

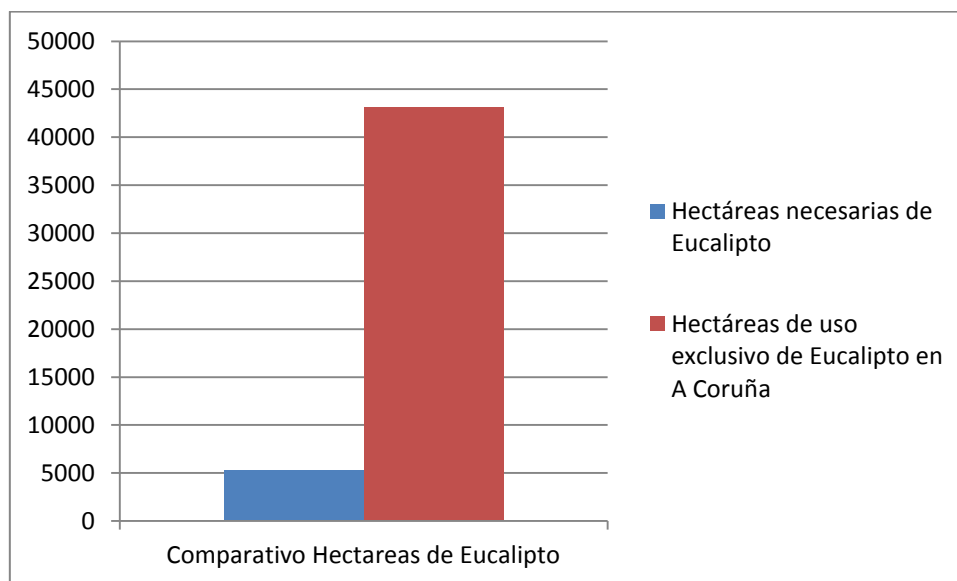



Figura 36: Comparación de hectáreas necesarias con hectáreas disponibles[5]

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Por lo que, podemos concluir que el abastecimiento de biomasa de eucalipto, para la planta de biomasa, estará asegurada, sin agotar los bosques y cultivos energéticos.

Rendimientos razonables

En este punto, compararemos los rendimientos calculados del ciclo Rankine de la planta, con otros rendimientos de otras plantas, para obtener una visión de su viabilidad económica.

Rendimientos	
Central térmica convencional	30 %
Ciclo combinado	55 %
Parques eólicos	50 % (Baja disponibilidad)
Plantas de biomasa	20-30 %
Rendimiento obtenido de nuestra planta de biomasa	30,56 %

Tabla 31 Comparación de rendimientos

Podemos observar en la tabla que el valor obtenido de rendimiento de la planta de biomasa es razonable al comparar con el rendimiento de otras plantas de biomasa. Aun así, es bajo comparado con los rendimientos de las plantas de ciclo combinado y los parques eólicos, aunque estos últimos tienen la desventaja de la baja disponibilidad debido a que dependen del viento.

2.4.3. Posibles mejoras del ciclo.

Teniendo ya un proyecto viable, podemos analizar posibles mejoras en el ciclo o en la planta para obtener mejores rendimientos, mayor potencia y mejoras en la vida útil de los equipos.

Las principales mejoras se enumeran a continuación:

- Reducción de la presión del condensador.
- Aumento de la presión de la caldera
- Aumento de la temperatura en la entrada de la turbina de vapor
- Recalentamiento en la segunda etapa de la turbina
- Realización de mayor número de extracciones
- Reducción de pérdidas de agua en la torre de refrigeración y reducción de los penachos
- Hibridación con gas natural
- Sustitución de la caldera por una supercrítica
- Reducción de título a la salida en la turbina de vapor
- Optimización de la temperatura en la extracción
- Realización de mayor número de extracciones



2.4.3.1. Reducción de la presión del condensador.

Esta mejora se realiza de forma habitual en centrales con ciclo de vapor, ya que se basa en aumentar el salto entálpico en la turbina, entre los puntos 1 y 3.

En nuestro caso, no se aplicaría debido a que se empleará una turbina de condensación con una presión inferior a la atmosférica de 0,08 bar. Si se reduce aun más la presión se podrían ocasionar pérdidas en los equipos por las grandes diferencias de presión así como el mayor porcentaje de líquido a la salida de la turbina, generando mayor erosión.

2.4.3.2. Aumento de la presión de la caldera

Esta mejora tiene el mismo efecto que la anterior, el aumento del salto entálpico en la turbina, entre los puntos 1 y 3.

El aumento de la presión en la caldera, ocasionará que la caldera tenga un coste superior y todos los equipos relacionados con ella, lo que produce un mayor coste en la instalación. Además de esto, la humedad a la salida de la turbina también aumentará, por lo que se aumentará la erosión en la turbina provocando paradas de la instalación no programadas.

2.4.3.3. Aumento de la temperatura en la entrada de la turbina de vapor

Al sobrecalentar aun más el vapor de entrada en la turbina, el trabajo en esta aumenta, sin la desventaja de aumentar la humedad a la salida de la turbina.

El inconveniente de esta mejora es que, debido a las altas temperaturas, los materiales de los equipos deberán soportar mayores esfuerzos térmicos, incrementándose los costes de dichos equipos y de la planta.

2.4.3.4. Recalentamiento en la segunda etapa de la turbina

Esta mejora consiste en recalentar el vapor de salida del primer cuerpo de la turbina hasta condiciones de sobrecalentamiento (cuerpo de alta) en la caldera, para luego introducirlo en el cuerpo de baja presión de la turbina, de esta forma se obtiene mayor trabajo en la turbina.

2.4.3.5. Realización de un mayor número de extracciones

Gracias a las extracciones de vapor en la turbina, se puede calentar el agua de alimentación a la caldera, aumentando su entalpía, ahorrando energía y aumentando el rendimiento, pero tiene como inconveniente la disminución de vapor a expansionar en la turbina, y por otro lado aumenta la complejidad de la planta.

Los puntos de extracción no suelen superar los siete, ya que no implicaría una mejora de rendimiento considerable frente a la complicación técnica que podría conllevar. Por esto, se debería aumentar el número de puntos de uno a tres, separando el desaireador precalentador, en un precalentador de baja presión, un desaireador y un precalentador de alta presión.



2.4.3.6. Reducción de pérdidas de agua en la torre de refrigeración y reducción de los penachos

Con esta mejora buscamos reducir el agua necesaria para alimentar al circuito de refrigeración. Si se lograra disminuir, implicaría una reducción de costes en bombas de captación y de vertido, así como un menor impacto medio ambiental de la planta al río Dubra.

La forma de reducir las pérdidas es aplicar mejoras en los equipos de eliminación de gotas. De esta forma se actuará sobre el vapor de agua que sale de la torre en forma de penacho, ya que es la condensación del vapor de agua que se ha evaporado en el proceso que se desarrolla en el interior de la torre de refrigeración.

Además los penachos al ser visibles pueden ser un factor de alarma social, ya que se asocian con la contaminación, aunque en este caso no contengan ningún contaminante en ellos.

Para reducir el efecto visible de los penachos, se puede recalentar el vapor de agua a la salida de la torre, de manera que se eleve suficientemente su punto de rocío y se evite la condensación, facilitando así su dispersión en la atmósfera como vapor. El recalentamiento se conseguiría mediante un serpentín en la boca de salida de la torre de refrigeración.

2.4.3.7. Hibridación con gas natural

El Real Decreto 661/2007, del 25 de Mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, establece la posibilidad de que en las plantas englobadas en la categoría b.6., aquella en la que se encuentra la planta de biomasa del proyecto, se emplee un combustible auxiliar siempre y cuando este no supere el 10 % de la energía primaria medida por medio de su poder calorífico inferior.

Mediante la hibridación se podrá usar gas natural como combustible auxiliar en caso de falta de suministro de biomasa o problemas en el sistema de biomasa de la planta, pudiendo continuar con el funcionamiento de la planta mientras se solucionan los problemas con el sistema de biomasa.

2.4.3.8. Sustitución de la caldera sub-crítica por una caldera súper-crítica.

La planta de biomasa descrita en este proyecto emplea una caldera sub-crítica, debida a su elevada fiabilidad, baja complejidad y por su uso extendido en todo tipo de plantas de combustión.

Se podría sustituir el tipo de caldera para obtener un ciclo súper-crítico, esta mejora produciría un pequeño incremento en el rendimiento del ciclo, debido a las altas temperaturas y altas presiones que alcanza el vapor a la salida de la caldera, por encima del punto crítico 225 bar.

Los inconvenientes de esta mejora esta en las condiciones de trabajo del ciclo, ya que requieren materiales de alta calidad para soportar las elevadas presiones y temperaturas del



vapor super-crítico, que además repercute en un mayor consumo en los equipos de bombeo, por lo que, el coste de la planta se incrementa.

Otras desventajas son las pérdidas por diferencias de presión que se ven incrementadas debido a las altas presiones dentro del ciclo, el mantenimiento de los equipos es más costoso y tiene mayores riesgos.

Observando las desventajas de la caldera super-crítica, se puede concluir que para plantas de poca potencia, como la de este proyecto, no es rentable el incremento del rendimiento del ciclo, a cambio de incrementar los costes de la planta a corto plazo (construcción) como a largo plazo (mantenimiento).

2.4.3.9. Reducción de título a la salida en la turbina de vapor

A la salida de la turbina de vapor tenemos un título aproximadamente del 14%, este valor es bastante elevado, ya que las turbinas modernas toleran un título entorno al 15 %. Un título superior provoca erosión en los álabes y reducción del rendimiento de la expansión.

La forma de reducirlo es aumentando la temperatura de entrada del vapor a la turbina y/o aumentar la presión del condensador. La primera, además de reducir el título, aumentaría el trabajo de la turbina, pero tiene los inconvenientes anteriormente mencionados, mientras que la segunda opción reduce el título a la salida, pero disminuye el trabajo de la turbina.

2.4.3.10. Optimización de la temperatura en la extracción

Considerando ya la mejora de las extracciones anteriormente mencionada, contaríamos con tres extracciones, la temperatura óptima para estas extracciones es:

Temperatura óptima de la primera extracción de vapor: Se calcula de forma que exista la misma diferencia de temperaturas entre la temperatura de entrada del vapor en la caldera y la temperatura de condensación.

$$T_{extracción} = T_{cond} + K$$

$$K = \frac{T_{turb} - T_{cond}}{2} = \frac{500 - 45}{2} = 227,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{1^{\circ}extracción} = 272,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Utilizando las tablas del agua saturada (líquido-vapor) obtenemos la presión que corresponde a la primera extracción:

$$\frac{T_b - T_a}{P_b - P_a} = \frac{T_2 - T_a}{P_2 - P_a}$$

$$T_b = 270 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_b = 54,99 \text{ bar}$$



$$T_a = 280\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_a = 64,12\text{ bar}$$

$$P_{1^{\circ}\text{extracción}} = 64,12\text{ bar}$$

Temperatura óptima de la segunda extracción de vapor

$$T_{2^{\circ}\text{extracción}} = T_{\text{cond}} + K$$

$$K = \frac{T_{1^{\circ}\text{extracción}} - T_{\text{cond}}}{2} = \frac{272,5 - 45}{2} = 113,75\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{2^{\circ}\text{extracción}} = 158,75\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Utilizando las tablas del agua saturada (líquido-vapor) obtenemos la presión que corresponde a la segunda extracción:

$$\frac{T_b - T_a}{P_b - P_a} = \frac{T_2 - T_a}{P_2 - P_a}$$

$$T_b = 160\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_b = 6,178\text{ bar}$$

$$T_a = 150\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_a = 4,758\text{ bar}$$

$$P_{2^{\circ}\text{extracción}} = 6\text{ bar}$$

Temperatura óptima de la tercera extracción de vapor

$$T_{3^{\circ}\text{extracción}} = T_{\text{cond}} + K$$

$$K = \frac{T_{1^{\circ}\text{extracción}} - T_{\text{cond}}}{3} = \frac{272,5 - 45}{3} = 75,833\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{3^{\circ}\text{extracción}} = 120,833\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Utilizando las tablas del agua saturada (líquido-vapor) obtenemos la presión que corresponde a la tercera extracción:

$$\frac{T_b - T_a}{P_b - P_a} = \frac{T_2 - T_a}{P_2 - P_a}$$

$$T_b = 130\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_b = 2,701\text{ bar}$$

$$T_a = 120\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_a = 1,985\text{ bar}$$

$$P_{3^{\circ}\text{extracción}} = 2,04\text{ bar}$$



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

BLOQUE III: ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES CALDERA Y TECNOLOGÍAS DE COMBUSTIÓN



1. OBJETO

El objeto de este bloque es la descripción de los distintos sistemas relacionados con la generación de vapor, elección del tipo de caldera y del tipo tecnología que se empleará en la caldera de la planta de biomasa.

Se tomará de partida todos los datos anteriormente calculados referidos a la caldera, así como los datos de diseño del ciclo cerrado agua/vapor. Las condiciones de funcionamiento de la caldera serán:

- Temperatura
- Presión
- Caudal

La función de la caldera será la de generar vapor mediante el aprovechamiento de calor generado tras la combustión de biomasa, concretamente el combustible empleado en la caldera, será eucalipto procedente de plantaciones de eucalipto.



2. TECNOLOGÍAS ESTUDIADAS

Lo primero de todo, elegiremos la tecnología que empleará la caldera de la planta de biomasa para generar el vapor necesario. Las distintas tecnologías estudiadas para el sistema de generación de vapor de la planta de biomasa del proyecto se diferencian en el sistema de combustión.

2.1. Clasificación según el sistema de combustión

A continuación se muestra una clasificación de las distintas tecnologías de sistema de combustión, estudiadas por ser las que mejor se adaptan al tipo de combustible contemplado en la planta de biomasa del proyecto.

En función del sistema de combustión interna empleada, las calderas estudiadas se clasifican en:

- Gasificación y Cámara Torsional
- Sistema de parrillas
- Lecho fluido burbujeante

A continuación se desglosan las principales características de cada una de las tecnologías.

2.1.1. Gasificación y Cámara Torsional

El sistema de combustión en este tipo de calderas está basado en la gasificación previa de los residuos forestales e inmediata combustión posterior de los gases generados, en una cámara de combustión torsional.

El gas generado en el gasificador, es un gas “pobre” obtenido como resultado de la gasificación de los hidrocarburos de la biomasa, de la combustión incompleta de la misma (CO) y contará adicionalmente con el contenido de humedad que se evapora de la biomasa.

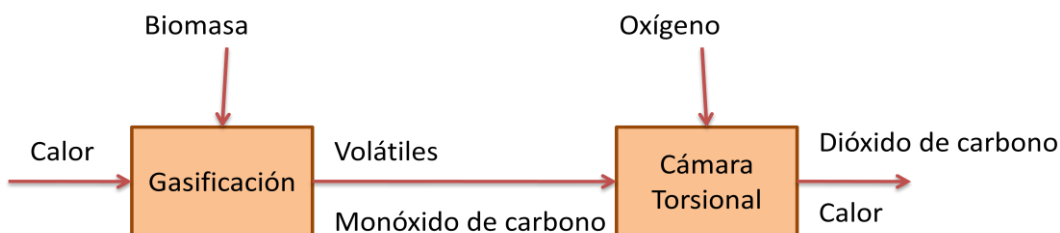


Figura 37: Gasificación y Cámara torsional



Este gas generado se quemará posteriormente en una cámara de combustión ciclónica, conocida como cámara torsional.

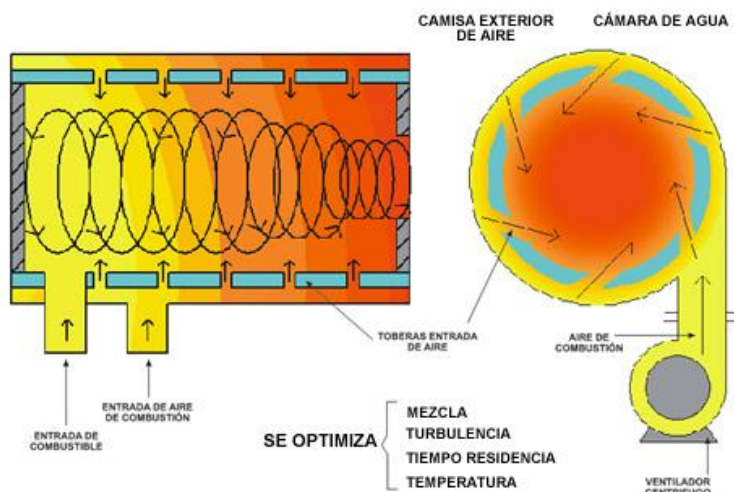
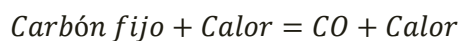


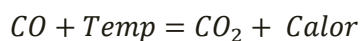
Figura 38: Combustión torsional[15]

El proceso se puede dividir en cuatro etapas. Dos etapas se darán en el gasificador y otras dos en la cámara torsional.

En el gasificador se darán las etapas que generarán los elementos combustibles que se quemarán en la cámara torsional (Volátiles y Monóxido de carbono).



En la cámara torsional se darán las etapas de combustión de los volátiles y monóxido de carbono, para la obtención del calor necesario para generación de vapor, para abastecer a la turbina.



2.1.1.1. Gasificador

En el gasificador se dará la pirolisis de la biomasa, generando los volátiles y el monóxido de carbono, el gasificador contará con una rejilla giratoria, constituida por discos escalonados excéntricos y una tolva en la parte inferior, aseguran una correcta y cómoda evacuación de cenizas. La rejilla no está en contacto con el fuego y por lo tanto se construye con chapa de



hierro común. La rejilla es movida mecánicamente por medio de un conjunto piñón-corona. El diseño y disposición de los platos permite, con cada movimiento de la rejilla, la caída de las cenizas que se van acumulando.

Los gases generados en los gasificadores son derivados a la cámara torsional donde se introduce el aire de combustión en forma exacta a través de una serie de tubos tangenciales y se produce la combustión.

2.1.1.2. Cámara torsional

La cámara torsional es un cilindro horizontal conectado a la caldera a través de un cuello cónico invertido. A lo largo de la cámara son colocadas toberas, por donde se ingresa el aire de combustión.

El diseño particular de estas cámaras permite que las partículas de biomasa estén mayor tiempo dentro de la zona de combustión en sustentación aerodinámica, mezclándose con el aire de combustión. Los elevados tiempos de residencia hacen que puedan alcanzarse altos valores de eficiencia en la combustión, con escaso contenido de inquemados y cenizas.


Debido a la inyección tangencial de aire en la periferia de la cámara cilíndrica se produce un campo potencial, que a su vez induce un campo rotacional axial como reacción a lo anterior. Mientras la velocidad tangencial del campo potencial aumenta con la disminución del radio, la velocidad tangencial de la corriente rotacional inducida aumenta con el radio; donde se igualan, se forma una muy activa y turbulenta capa límite, lo que mantiene una intensa combustión en las condiciones más favorables.

Las partículas de combustible también son inyectadas tangencialmente en el cilindro. Aquellas ubicadas en el campo potencial capaces de fluir hacia el centro siguen una trayectoria espiral logarítmica; aquellas sometidas al campo rotacional seguirán una trayectoria de espiral aritmética.

En la capa límite, mientras las partículas ubicadas del lado del campo potencial solo rotan alrededor del centro (siendo el campo potencial irrotacional), aquellas en el lado del campo rotacional no solo rotan alrededor del centro sino que también giran sobre su propio eje.

Fuerzas turbulentas actúan en la capa límite creando un campo torsional alrededor de las partículas en combustión. Esta interacción favorece la disociación de los productos de combustión y da acceso a oxígeno “fresco”.

Introduciendo una restricción al final del cilindro (el cuello cónico) la presión creada en el anillo de la garganta genera fuerzas axiales, y la dinámica del sistema es tal, que las partículas que llegan al frente cerrado siguen una trayectoria helicoidal en la periferia del cilindro hacia la garganta, vuelven al frente continuando en hélices de diámetro cada vez menor, y finalmente abandonando la cámara a través de la garganta, en una aún más pequeña trayectoria

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

helicoidal. Esto implicará un mayor tiempo de permanencia del combustible, favoreciendo la combustión completa.

Los sistemas de limpieza, con una parte de las cenizas abandonan la cámara a través de su cuello y entran a la caldera, mientras que los restos de cenizas serán retirados periódicamente de la cámara torsional.

2.1.2. Sistema de parrillas

Otra de las tecnologías de generación de vapor estudiada se fundamenta en la combustión de la biomasa sobre un sistema de parrillas.

El principio de funcionamiento de este tipo de tecnología se basa en el avance del combustible mediante el arrastre por las parrillas. Estos elementos sostienen al combustible, insuflándose entre los mismos el aire necesario para la combustión. Según van avanzando los residuos se va completando la combustión de los mismos, de forma que a la salida el contenido de inquemados es bajo.

El material de combustión en su avance por la parrilla, pasa por tres etapas consecutivas de proceso. En la primera de ellas se produce la evaporación del agua contenida en el combustible, posteriormente se produce la combustión principal del mismo, completándose finalmente en la última etapa mediante la combustión de las fracciones con mayor temperatura de ignición.

2.1.2.1. Hogar reactor

En el hogar reactor tiene lugar la etapa inicial de la caldera, es donde se genera la combustión.

La cámara de combustión posee paredes de tubos aleteados, tipo membrana enfriados por agua, que posibilita una alta absorción térmica, siendo cubiertas con materiales refractarios hasta una determinada altura, formando una zona que propicia una mejor combustión de los combustibles con alto contenido de humedad.

Dentro de la tecnología de parrillas existen diferentes tipos de parrillas, en función del tipo de movimiento.

- Fijas: El movimiento se consigue mediante la vibración la inclinación de la parrilla.
- Móviles: Desplazan la biomasa a lo largo de la parrilla.
- Mixtas: La caldera contara con los dos tipos de parrillas divididas en zonas, de tal forma que se garantiza una perfecta distribución del combustible en los diversos regímenes de operación de la caldera.

También podemos distinguir según:



- Barras longitudinales
- Barras transversales
- Rodillos
- Alimentación invertida.

2.1.3. Lecho fluido

La combustión en lecho fluidizado consiste en desarrollar la combustión en el seno de una masa de suspensión de: partículas de combustible, cenizas y un inerte (arena), los cuales son fluidizados por una corriente de aire de combustión ascensional.

Solamente entre un 2 y 3% del lecho es carbonoso, el resto está compuesto de material inerte (arena). Ya que este material inerte se comporta como un gran almacén de calor en el hogar de la caldera. De esta manera las calderas de lecho fluidizado son capaces de amortiguar el efecto de las posibles fluctuaciones en el poder calorífico del combustible, debidas a las variaciones de humedad o composición del combustible, en la generación de vapor.

El combustible se alimenta sobre la superficie de lecho fluido a través de unas bocas en las paredes laterales de la caldera.

El material del lecho se fluidiza mediante gas fluidizante (aire primario y recirculación de gases de combustión), que se insuflan a través del lecho. El aire de combustión restante, se proporciona como aire secundario que se sopla por encima de las bocas de alimentación de combustible a través de las bocas de aire en las paredes del horno.

En la parte inferior se encuentra la parrilla, la cual está refrigerada por agua. La refrigeración se realiza mediante tubos evaporadores que van conectados a las tuberías de la pared del horno.

El aire utilizado para la fluidización se introduce mediante un ventilador de aire primario en una caja de viento situado en la parte inferior de la parrilla.

El resto de aire necesario, se conduce en el horno encima de la sección con revestimiento refractario para completar la combustión del combustible volatilizado y del carbón fijo. Esto garantiza una buena mezcla y una alta temperatura que garantiza una completa combustión y una reducción en la formación de NOx.

Las emisiones de SO₂ producidas por la combustión de biomasa son generalmente muy bajas, pero cuando el contenido de azufre de la biomasa es elevado, se puede añadir caliza al lecho fluido para lograr un alto grado de retención de azufre en el mismo.



Los lechos fluidizados se diferencian entre sí básicamente por la velocidad del aire que los atraviesa. Al incrementar la velocidad del aire los lechos pasan de fijos a burbujeante, turbulentos y circulantes.

- Lecho burbujeante: El aire tiene una mayor velocidad que en el caso anterior de lecho fijo. El aire es capaz de fluidizar el lecho y generar burbujas en su seno. La velocidad del aire se deberá regular para que permanezcan en el lecho la mayor parte de los sólidos y solamente una parte pequeña (10%) salgan del lecho y lleguen al ciclón. Este tipo de fluidización se denomina “en fase densa”, caracterizándose por que tiene una superficie libre bien definida.
- Lecho Turbulento: El aire tiene una mayor velocidad, aumenta el porcentaje de sólidos que salen del lecho.
- Lecho Circulante: La velocidad es tan alta, que produce el arrastre de gran cantidad de sólidos del lecho, pudiéndose reciclar una gran parte de estos mediante un ciclón o multiciclón.

2.2. Ventajas y desventajas de las tecnologías estudiadas

2.2.1. Gasificación + Cámara de torsión

2.2.1.1. Ventajas

- Independiza la pirolisis y la gasificación del combustible del proceso de combustión, para aumentar la eficiencia de ambos procesos.
- Menor exceso de aire de combustión, lo que redonda en la simplicidad de los equipos auxiliares de la caldera. Esto a su vez puede suponer menores costos de operación y mantenimiento de los equipos empleados.
- La cámara de torsión permite tiempos de permanencia de la partícula mayores que en los sistemas convencionales facilitando una combustión bastante completa de la biomasa empleada. Esto a su vez implica que la cantidad de monóxido de carbono en los gases de salida sea inferior.
- Elevados valores de eficiencia térmica que suponen importantes ahorros de combustible.
- Bajos niveles de emisiones de CO y NOx.
- Extracción de grandes cantidades de cenizas por la parte inferior de los gasificadores, lo que reduce el ensuciamiento de la caldera.



- La dosificación del aire en la cámara torsional, permite uniformar las temperaturas dentro de la misma, minimizando la fusión de cenizas, con lo que se logra separar y evacuar parte de las mismas en la propia cámara de combustión.

2.2.1.2. Desventajas

- Es la tecnología, con respecto a las estudiadas, con menor número de equipos en operación en plantas de biomasa.
- El hecho de independizar la gasificación y la combustión y que para la gasificación se necesiten varios gasificadores, redundan en un mayor número de equipos o elementos auxiliares, labores de mantenimiento de los mismos, necesidad de acompañar ambos procesos etc.

2.2.2. Sistema de parrillas

2.2.2.1. Ventajas

- Tecnología ampliamente probada; Es la tecnología que tradicionalmente ha venido usándose para la combustión de todo tipo de combustibles, existiendo numerosas referencias en el mercado.
- Admite perfectamente una alta variación en la granulometría del combustible.
- Mayor simplicidad del sistema de alimentación de combustible.

2.2.2.2. Desventajas

- Elevadas temperaturas sobre la parrilla
- Mayores emisiones de CO y NO_x, formación de aglomerados y escorias sobre la parrilla y paredes de la cámara de combustión y depósitos en los tubos de la región de intercambio de calor por convección.
- Implementación de sistemas hidráulicos, aspecto desfavorable desde el punto de vista del mantenimiento.

2.2.3. Lecho fluidizado

2.2.3.1. Ventajas

- Caldera apta para la utilización de combustibles de alto contenido de humedad y bajo poder calorífico. La humedad del combustible puede variar considerablemente sin afectar negativamente la combustión, debido a la alta capacidad de calor del lecho fluidizado que aporta el material inerte que se emplea en el proceso de combustión.
- Altas eficiencias de combustión debido a la mezcla turbulenta y al largo tiempo de residencia en la cámara de combustión, lo que redundan en rendimientos térmicos elevados.
- Los procesos corrosivos son menores al añadirse una aditivación en el lecho, lo que favorece igualmente la calidad de los gases de escape.



- Los inquemados del horno se pueden enfriar y separar de la arena por procedimientos en seco, evitándose el efluente de apagado de escorias.
- Bajas emisiones de NO_x debido a la baja temperatura del lecho y a la combustión escalonada de la biomasa.
- Estas calderas permiten la quema de combustibles con un alto contenido de sustancias contaminantes inertes, como por ejemplo, piedras, hierro, etc...
- Su tecnología de más reciente implantación, sin embargo cuenta con gran cantidad de referencias con buenos resultados, de modo que fabricantes líderes en el sector han apostado por esta tecnología.

2.2.3.2. Desventajas

- Como consecuencia del manejo de arena de sílice, se produce mayor cantidad de polvos en los humos.
- En la mayoría de los casos se necesita una trituración homogénea de los residuos de la combustión, ya que de otra forma se pueden producir atascos en los sistemas de alimentación y problemas en los hornos.
- Generalmente supone mayores consumos de energía eléctrica, por la incidencia que representa la soplante del lecho. Este hecho puede suponer mayores costos de operación y mantenimiento.

2.3. Conclusión de la tecnología empleada


La elección de la tecnología empleada para la combustión en la caldera se tomará en función de las ventajas y desventajas de cada tecnología, anteriormente mencionadas, además de las características particulares de la planta, así pues, podemos concluir que la tecnología que mejor se adapta a las necesidades de la planta es la tecnología de sistema de parrillas.

Se ha descartado el lecho fluidizado frente a las parrillas debido a su mayor consumo de energía eléctrica, mayores costes de operación y mantenimiento, ya que no compensan en una planta de 10 MW.

Se ha descartado la cámara torsional frente a las parrillas debido a que es una tecnología poco usada en planta de biomasa debido a que necesita un mayor número de equipos o elementos auxiliares, que suponen un mayor mantenimiento, además de la mayor complejidad debido a la necesidad de acompañar el gasificador con la cámara torsional.

Finalmente se puede contrastar esta conclusión con el documento “BIOMASS COMBUSTION FOR POWER GENERATION” realizado por Richard Van Den Broek, Faaij y Van Wijk, del departamento de Ciencia, Tecnología y Sociedad de la Universidad Utrecht.

Dicho documento compara las diferentes tecnologías para la combustión de la biomasa, en él, podemos ver que ninguna de las tecnologías estudiadas es claramente superior a las otras, “None of the existing technologies is found to be superior with respect to all the criteria selected”, por lo que la decisión de la tecnología de combustión se debe basar en las

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

características particulares de cada planta (Criterios de Operación, Combustible, Eficiencia y Emisiones).

A continuación podemos ver la siguiente tabla que nos muestra los criterios antes mencionados.

Table 1. The main results of the qualitative analysis							
Criterion*	Pileburner	Grate-fired			Suspension fired	Fluidised bed	
		stationary	travelling	vibrating		bubbling	circulating
<i>Operation-related criteria</i>							
Combustion control	—	—					
Load response	--			+	+		
Maintenance-friendly			—	+			
Operating experience	++	++	++	+		0	0
<i>Fuel-related criteria</i>							
Fuel moisture flexibility	++	+	+	++	--	+	+
Fuel size flexibility	++	+	+	+	--	++	+
Fuel fouling resistance		—					—
Explosion safety					—		
<i>Efficiency-related criteria</i>							
Carbon burnout efficiency	--			+		+	++
Modest excess air requirement					+	+	+
Modest fan capacity requirement					—	—	--
<i>Emission-related criteria</i>							
Limitation of thermal NO _x formation	—	0	0	+		++	++
Acid gas absorption						+	++

Tabla 32 Principales resultados del análisis cualitativo[26]

Las dos tecnología que destacan más son la de parrillas y la de lecho fluidizante, para poder descartar una de ellas, nos hemos basado en los mayores consumos de energía eléctrica y mantenimiento que conllevaría utilizar el lecho fluidizado, como se ha indicado anteriormente.

Por lo que queda contrastado que la mejor tecnología de combustión para esta planta es la tecnología de parrillas.



3. TIPOS DE CALDERAS

El último paso para la elección de la caldera, sabiendo ya la tecnología que empleará es la elección del tipo de caldera.

La elección de la caldera se tomará en función de los valores de diseño en el ciclo cerrado agua/vapor de la planta.

La clasificación de las calderas viene dada por:

- Presión de trabajo
- Generación
- Circulación del agua dentro de la caldera
- Circulación del agua y los gases calientes en la zona de tubos de las calderas.

Presión de trabajo

- Baja presión: 0 – 2.5 bar
- Media presión: 2.5 – 10 bar
- Alta presión: 10 – 220 bar
- Supercríticas: > 220 bar

La caldera será de alta presión, porque la máxima presión de trabajo de la caldera es 80 bar.

Generación

- Agua Caliente
- Vapor

La caldera será de generación de vapor, para poder alimentar a la turbina de vapor.

Circulación del agua dentro de la caldera

- Circulación natural: El agua se mueve por efecto térmico
- Circulación forzada: El agua se hace circular mediante bombas

La circulación del agua en la planta se hará mediante bombas. La caldera será alimentada mediante un sistema de bombas de alimentación.



Circulación del agua y los gases calientes en la zona de tubos de las calderas

- Pirotubulares o de tubos de humo:

En estas calderas los humos pasan por dentro de los tubos cediendo su calor al agua que los rodea. Sus presiones de trabajo no superan los 18 bar y tienen unos flujos máximos de 20 t/h.

- Acuotubulares o de tubos de agua:

El agua circula por dentro de los tubos, captando calor de los gases calientes que pasan por el exterior. Permiten generar grandes cantidades de vapor sobrecalentado a altas presiones y altas temperaturas. Su capacidad pueden llegar a 2.000 t/h, alcanzan temperaturas del orden de 550°C y presiones de 200 bar.

Debido a las altas temperaturas y presiones que tenemos en el ciclo cerrado agua/vapor, solo podemos elegir las calderas del tipo acuotubulares.

3.1. Conclusión del tipo de caldera empleada

El tipo de caldera será acuotubular de alta presión y se empleará para generar vapor para la alimentación de la turbina. Su alimentación será mediante un sistema de bombeo de alimentación.



4. CARACTERÍSTICAS CALDERA DE VAPOR

A continuación se desglosan y describen brevemente, los principales componentes de la caldera de vapor elegida anteriormente.

4.1. Clasificación, Almacenamiento y Alimentación de combustible

En la planta de biomasa, será necesario un sistema de tratamiento de biomasa, para poder así adecuar la biomasa al tamaño óptimo para la alimentación de la caldera.

El combustible empleado será eucalipto, procedente de cultivos energéticos.

La biomasa procedente de la astilladora será sometida a un proceso de separación de no férricos, férricos y escorias, para evitar problemas en los diversos equipos de la planta. Posteriormente, la biomasa será sometida a un proceso de cribado de modo que las partículas cuyas dimensiones difieran con las establecidas para la alimentación a caldera sean rechazadas y devueltas a la astilladora. Las partículas cuyas dimensiones sean óptimas serán transportadas a una serie de silos de almacenamiento con una capacidad de varios días.

La alimentación a la caldera se realiza finalmente por medio de un cinta transportadora, que recibe el combustible saliente del silo y lo eleva hasta el punto dosificador de la caldera.

4.2. Sistema de combustión/ Hogar

En la actualidad existen diferentes variantes tecnológicas de caldera, las cuales se diferencian principalmente en el sistema de combustión que implementan.

Los distintos sistemas de combustión que se han estudiado, para la planta de biomasa de este proyecto, son:

- Sistema de parrillas
- Cámara torsional
- Lecho fluidizado burbujeante

En el apartado 2 del presente bloque se describen las características funcionales más relevantes de cada sistema estudiado.

4.3. Sistema agua alimentación

La caldera de vapor está relacionada con el sistema de agua de alimentación de la planta, ya que este sistema es el encargado de suministrar el agua necesaria al generador de vapor.

El dimensionado de la caldera de vapor se realiza en base a las condiciones de agua de alimentación a una temperatura de aproximadamente 200 °C y 80 bar de presión

El sistema de agua de alimentación está constituido normalmente por tres subsistemas:



- Precalentamiento de baja presión
- Alimentación de alta presión
- Precalentamiento de alta presión

El precalentador de baja presión es el encargado de calentar la corriente de condensado entre el condensador y el tanque de agua de alimentación /desaireador. Con esto se consigue un aumento del rendimiento del ciclo agua-vapor, ya que el vapor de baja presión que ya ha sufrido una expansión en la turbina se utiliza para precalentar el condensado.

El agua procedente del precalentador de baja presión llega al tanque de alimentación de agua/desaireador. Este evitará la alta concentración de oxígeno, anhídrido carbónico y otros gases presentes en la disolución de todas las aguas.

El agua será bombeada desde el desaireador de agua hasta el precalentador de alta presión.

El precalentador de alta presión será el encargado de precalentar la corriente de agua que llega a la caldera de vapor impulsada por medio de las bombas de alimentación. Este intercambiador de calor se presurizará con vapor de alta presión procedente de la extracción de la turbina.

En este proyecto por simplificar el cálculo en equipos se ha diseñado la planta con un único precalentador y desaireador en un mismo equipo, dicho equipo, usa el vapor ya expandido de la única extracción de la turbina para calentar la corriente de condensado entre el condensador y el desaireador/precalentador.

4.4. Economizador

En una unidad generadora de vapor, el economizador representa una sección independiente de superficie de intercambio, destinada a recuperar el calor residual de los gases de escape, en donde quiera que los ahorros en la operación de la caldera justifican los costos de su instalación.

El economizador es la primera de las partes de presión que componen la caldera y se encuentra situado en la parte posterior de la caldera.

Su función es calentar el agua de alimentación gracias al calor de los gases de combustión, aumentando la eficiencia térmica de la caldera y disminuyendo por tanto el consumo de combustible.

4.5. Calderín de vapor

La caldera cuenta con un calderín de vapor al que llega el agua procedente del precalentador de agua de alimentación. Su finalidad es separar el vapor del agua y actuar de almacén del vapor.

Desde el calderín el agua fluye hacia el evaporador a través de unos tubos descendentes. Desde el evaporador la mezcla de agua-vapor se dirige a los separadores de ciclón donde se



produce la separación de la mezcla agua-vapor. El agua separada será devuelta al sistema del evaporador.

4.6. Sobrecalentadores

Los sobrecalentadores tienen como función calentar el vapor saturado, transformándolo en vapor sobrecalentado, mejorando el aprovechamiento de los gases de combustión.

Los sobrecalentadores son tubos lisos distribuidos en serpentines, totalmente refrigerados y estancos frente a salida de gases o entradas de aire.

4.7. Sistema de aire de combustión

El sistema de aire de combustión tiene como función proporcionar el aire necesario para que se produzca la combustión.

En el sistema de aire de combustión se divide en aire primario y secundario, pero el punto concreto dentro de la caldera, donde este aire ingresa, es diferente en función del tipo de caldera.

A continuación se muestra una breve descripción de los caudales de aires introducidos en función de la tecnología empleada:

- Sistema de parrillas
 - Aire primario: este caudal de aire es introducido a nivel de la cámara de combustión, por debajo de la parrilla, permitiendo la combustión de la biomasa empleada como combustible. Dicho aire estará precalentado.
 - Aire secundario (overfire air): durante la combustión de la biomasa las sustancias volátiles se queman a cierta altura sobre la parrilla por lo que es necesario inyectar aire en esta zona. Dicho aire estará precalentado.
- Cámara torsional
 - Aire primario: es el aire que se introduce bajo la rejilla en el gasificador para producir la gasificación del combustible. Este aire no se precalienta.
 - Aire secundario: es el aire que se introduce de forma tangencial en la cámara de torsión induciendo un campo rotacional axial en el que se desarrolla la combustión. Este aire estará precalentado.
- Lecho fluidizado burbujeante
 - Aire primario: es el aire introducido por la parte inferior del lecho, que se encarga de fluidizarlo además de emplearse para la propia combustión. Este aire estará precalentado.
 - Aire secundario: este caudal de aire se introduce en tres niveles distintos por encima del lecho, permitiendo la combustión completa y escalonada de la biomasa introducida en la caldera. Este aire estará precalentado.



Para que los distintos caudales de aire requeridos, se introduzcan en la caldera en las condiciones adecuadas, se implementan los siguientes equipos asociados a la alimentación de aire.

4.7.1. Ventilador aire forzado primario

Para la entrada del aire primario necesario para la combustión en la caldera se utilizará un ventilador de aire forzado primario, de tipo centrífugo.

El aire primario será tomado de la atmósfera e insuflado mediante un ventilador de aire primario a través de un precalentador de aire (a excepción de la caldera de tecnología gasificador + cámara torsional, donde el aire primario se introduce directamente desde la atmósfera sin precalentarlo previamente).

El precalentador de aire tiene como función elevar la temperatura del aire primario antes de ingresar en la cámara de combustión de la caldera, a través del intercambio de calor, cedido por los gases residuales calientes.

4.7.2. Ventilador aire forzado secundario

Para la entrada de aire secundario se contará con un ventilador de aire forzado secundario de tipo centrífugo.

Este ventilador suministra aire secundario a los precalentadores de aire, tras lo cual el flujo se distribuye por la caldera.

Así mismo este ventilador será el encargado de suministrar aire a los quemadores de arranque de la caldera.

4.8. Sistema de gases de combustión

El sistema de gases de combustión comprende el conducto de gases desde la caldera hasta el ventilador de tiro inducido y la chimenea.

4.8.1. Ventilador de tiro inducido

El ventilador de tiro inducido está diseñado para manejar gases a elevadas temperaturas y para crear la presión de aspiración necesaria, con objeto de vencer las pérdidas de carga de todo el circuito.

4.8.2. Conductos de gases

Estos conductos unirán la salida de la caldera hasta el ventilador de tiro inducido y desde la impulsión de estos hasta la chimenea pasando por los diferentes equipos de tratamiento de gases.



4.8.3. Sistema depuración de humos

La función del sistema de depuración de gases tiene como función la retirada del material particulado de mayor tamaño presente en los gases de combustión.

El sistema de depuración de gases incluirá al menos los siguientes equipos: multiciclón y filtro de mangas.

4.8.4. Multiciclones

La función de los multiciclones es la retirada del material particulado de mayor tamaño que es arrastrado por los gases de combustión.

Los gases serán forzados a pasar por los multiciclones, adquiriendo movimiento circular, provocando la separación de partículas sólidas de mayor inercia.

Las partículas se recogen en el fondo de la carcasa, de donde son removidas a través de una válvula rotativa, para las descargas de evacuación.

4.8.5. Filtro de mangas/ Precipitador electrostático

La limpieza de los gases de escape de la caldera se realizará mediante filtros de mangas o mediante precipitadores electrostáticos, en orden a conseguir unos niveles de emisión a la salida, acordes con la normativa vigente en esta materia.

Los gases de combustión serán forzados a pasar por el sistema de limpieza, en orden a retirar las partículas contenidas en el mismo, antes de su evacuación a través de la chimenea.

El principio de funcionamiento de limpieza de los filtros de mangas, consiste en la inyección de aire comprimido a través de aceleradores del flujo, montados en el plenum superior, uno para cada manga. La separación del sólido se efectúa haciendo pasar el efluente gaseoso con partículas en suspensión, mediante un ventilador, a través del tejido que incluye cada manga de forma que las partículas queden retenidas entre los intersticios de la tela.

Por otro lado el principio de funcionamiento de los precipitadores electrostáticos, se basa en la ionización de las partículas presentes en el efluente de gases de combustión. Las partículas se cargan mediante el choque con iones gaseosos creados por la ionización del aire creado entre los electrodos, tras la carga las partículas siguen las líneas de campo producidas por el alto voltaje hasta la superficie del electrodo colector. Las partículas deben ser eliminadas de las placas y recolectadas en una tolva, evitando que se reencaucen en la corriente gaseosa.



4.8.6. Chimenea

La chimenea es el conducto vertical por el que se expulsan los humos de la combustión producida en la caldera de vapor. Se comunica a los gases una cierta velocidad de salida debido a la depresión que se genera por la diferencia de peso entre los humos generados y el aire exterior.

4.9. Tratamiento de cenizas

Las cenizas de la caldera contienen no sólo cenizas sino también posibles impurezas aportadas a la caldera con el combustible.

Cada subzona de aire primario tiene su propia tolva de recogida de cenizas, las cuales son evacuadas al exterior mediante un tornillo sinfín. De ésta manera, se dispondrá de dos sistemas separados de recogida y almacenamiento de todas las cenizas producidas en la combustión, para su posterior disposición por un gestor autorizado. Estas dos subzonas son las siguientes:

- Caldera
- Multiciclón y filtros mangas

Uno de ellos consistirá en una serie de sinfines situados en el fondo de la caldera, los cuales vaciarán en un transportador. Éste transportador depositará la ceniza en un contenedor.

El otro sistema consistirá en instalar debajo de los haces de intercambio unas tolvas decantadoras con válvulas rotativas y conductos bajantes al extractor general de cenizas de caldera.

La salida del multiciclón separador dispondrá de válvulas alveolares, las cuales conducirán las cenizas a un colector. Éste transportará las cenizas volantes a otro contenedor. A este mismo contenedor se transportarán las cenizas captadas por los filtros de mangas.



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

BLOQUE IV: IMPACTO MEDIOAMBIENTAL



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

1. OBJETIVO

El objetivo de este bloque es estudiar el impacto medioambiental, en lo referido a concentraciones de contaminantes, provocadas por la caldera de la planta de biomasa. Para ello se utilizará el modelo Gaussiano de dispersión de contaminantes ISC3 (Industrial SourcemodelComplex) recomendado por la US EPA.



2. MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

Antes de describir el modelo IC3 vamos a estudiar la atmósfera, el ciclo de los contaminantes atmosféricos y los diferentes aspectos que pueden modificar la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

2.1. Atmósfera

La atmósfera se encuentra en la parte más externa de la Tierra, está formada por diversos gases y se puede dividir de cinco capas según su temperatura.

- Exosfera: Apenas existen moléculas de materia en ella, no tiene efectos en la meteorología.
- Termosfera o Ionosfera: Los átomos se encuentran en disgregación atómica, abundando las partículas con carga eléctrica. Tiene un gran interés para los meteorólogos ya que es donde tienen lugar los fenómenos meteorológicos responsables de los cambios del tiempo atmosférico.
- Mesosfera: Capa donde se puede alcanzar los $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Estratosfera: Es la capa que contiene la mayor parte de ozono que retiene las radiaciones ultravioletas del espacio exterior, permitiendo el desarrollo de la vida terrestre.
- Troposfera: Es la capa más próxima a la superficie de la Tierra.

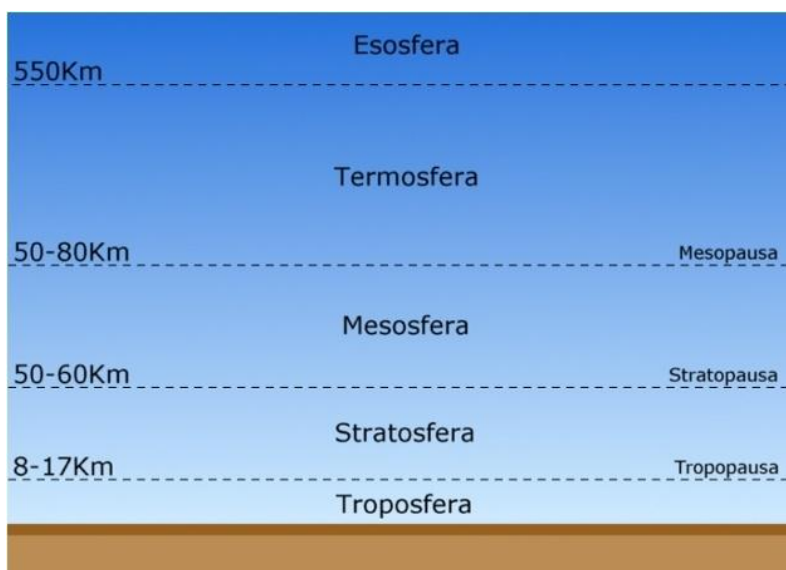


Figura 39: Capas de la atmósfera



La troposfera es la capa de la atmósfera que nos interesa, ya que es la capa más próxima a la Tierra y es donde se produce, en primera instancia, la dispersión de los contaminantes. Contiene la mayor parte de vapor de agua y de oxígeno, actúa de regulador térmico gracias al vapor de agua, además tiene un espesor medio de 11 km y en ella ocurren todos los fenómenos meteorológicos que influyen en los seres vivos, como los vientos, la lluvia y los huracanes.

2.2. Ciclo de los contaminantes atmosféricos

Las emisiones de los contaminantes no solo se dispersan en la troposfera, sino que sufren interacciones químicas dando lugar a nuevos contaminantes llamados contaminantes secundarios.



Figura 40: Ciclo de los contaminantes atmosféricos

Las distintas fases son:

Emisiones: Es la liberación del contaminante hacia la atmósfera.

Dispersión: Los contaminantes producidos por las fuentes de emisión al ingresar a la atmósfera se dispersan, es decir se mezclan en ella, diluyéndose y alejándose de la fuente.

Interacciones Químicas: Una vez que los contaminantes se encuentren en la atmósfera, es posible que surjan nuevas sustancias debido a la interacción entre ellas. Como puede ser la interacción de los NO_x con los COV (Compuestos orgánicos volátiles) con presencia de radiación ultravioleta, que produce O_3 y contaminantes secundarios.

Salida de la Atmósfera: El tiempo de permanencia en la atmósfera de un contaminante es variable. Depende del contaminante, del área de dispersión y las interacciones químicas que transforman al contaminante en otros compuestos.

2.3. Dispersión de contaminantes en el aire

Nos centraremos en la dispersión de contaminantes y los aspectos que la influyen, ya que nos dará las herramientas necesarias para comprobar el impacto medioambiental en la zona próxima de la planta.



La dispersión tiene tres fases bien definidas:

- Descarga vertical de los humos de la caldera desde la chimenea.
- Curvatura del penacho debido al viento horizontal.
- El penacho se aleja y estabiliza a una cierta altura. (Flotación térmica)

Gracias a estas tres fases los contaminantes se diluyen y se alejan de la fuente.

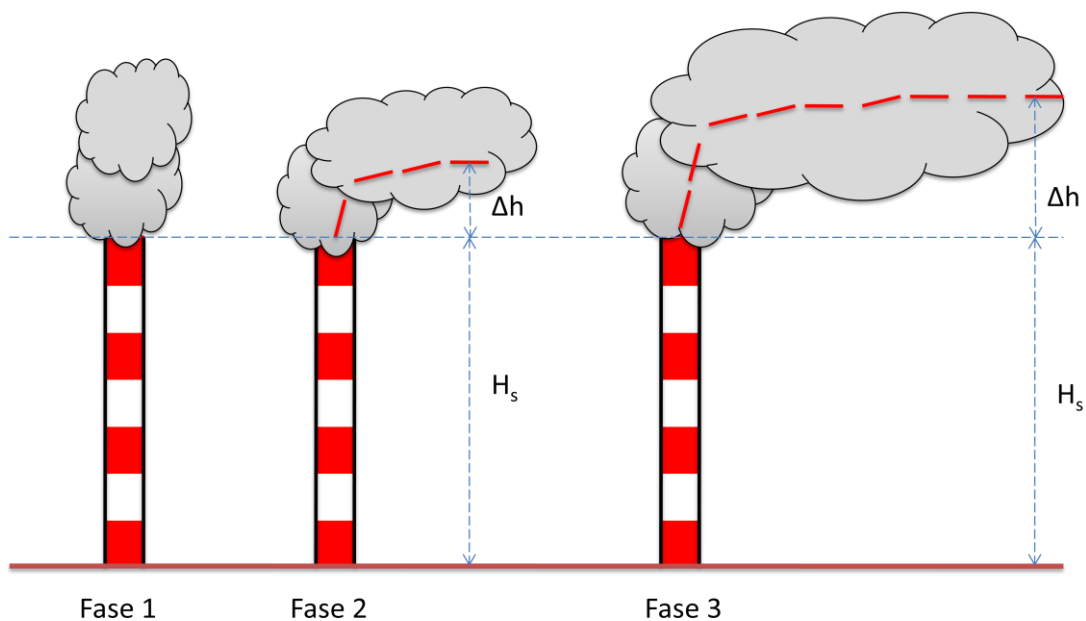



Figura 41: Fases de un penacho

Aspectos que afectan a la dispersión:

- Efectos del viento
- Estabilidad atmosférica
- Topografía
- Inversión y altura de la mezcla
- Movimiento de los penachos

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

2.3.1. Efecto del viento

El efecto del viento influye en el movimiento del penacho reduciendo la concentración de contaminantes, por lo que a mayor viento mayor será su dispersión. Aunque la velocidad del viento es muy importante en la dispersión de contaminantes, es aun mayor la importancia que tiene la dirección del viento, como podemos ver en la siguiente tabla.

Variación de la dirección del viento	Reducción de la concentración de contaminante
5 %	10% en condiciones inestables
	50% en condiciones neutras
	90% en condiciones estables

Tabla 33: Efecto de la variación del viento

La variación de la dirección del viento en 5 % puede disminuir la concentración de contaminantes hasta en un 90 %.

2.3.2. Estabilidad atmosférica

El ciclo diario del calentamiento y enfriamiento del suelo bajo la acción de la radiación del sol, así como la mezcla de masas de aire de procedencia diferente tiene como consecuencia la modificación del valor de la temperatura del aire en función de la altura. Esta modificación repercute en la habilidad de la atmósfera en iniciar o inhibir los movimientos verticales del aire.

De manera general una atmósfera estable es aquella que inhibe los movimientos verticales mientras que una atmósfera inestable los amplifica. Una atmósfera se denomina neutra cuando es indiferente a estos movimientos. Las superficies más rugosas (como árboles o edificios) tienen mayor influencia en el desarrollo inestable de un penacho de humo que las superficies mas lisas.

Por lo que una atmósfera inestable favorece el movimiento vertical y por lo tanto tiene una mayor dispersión.

En el modelo de Pasquill y Gifford la estabilidad atmosférica se representa por seis categorías, variando de A a la F y siendo A la categoría más inestable y F la más estable. Generalmente, las condiciones más inestables ocurren durante los periodos de velocidad del viento de baja a moderada y con intensa radiación solar (tardes). Las condiciones atmosféricas estables ocurren durante las noches claras con menores vientos. Las condiciones sumamente estables con poco viento pueden mantener los contaminantes cerca de la tierra y en las cercanías de la fuente, produciendo unas concentraciones altas del contaminante.



Condiciones meteorológicas que definen las diferentes categorías de estabilidad según Pasquill y Gifford

Velocidad del viento	Radiación solar diurna			Condiciones nocturnas	
	Fuerte	Moderada	Suave	Cubierto	Claros
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Tabla 34: Condiciones meteorológicas que definen las diferentes categorías de estabilidad según Pasquill y Gifford

- *A extremadamente inestable*
- *B moderadamente inestable*
- *C ligeramente inestable*
- *D neutra*
- *E ligeramente estable*
- *F moderadamente estable*

2.3.3. Topografía

La difusión de los contaminantes se ve influenciada por la topografía próxima a la planta, la topografía más importante serán las montañas, los valles y las brisas marinas. Y en menor medida obstáculos menores como edificios y otras construcciones.

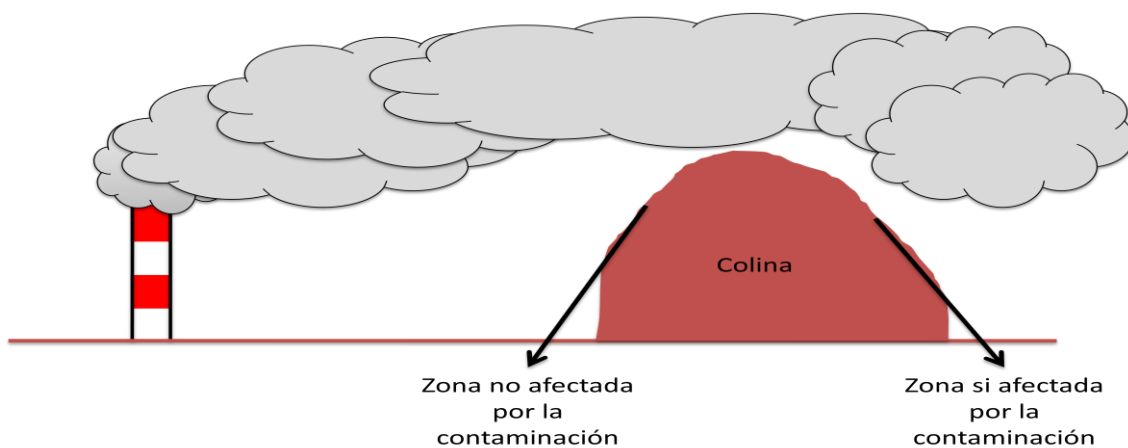


Figura 42: Influencia de los contaminantes en las distintas zonas de una colina



2.3.4. Altura de mezcla atmosférica

La atmósfera esta a menudo estratificada en capas con poca mezcla entre ellas. La altura de la parte superior de la capa más baja se conoce como la altura de mezcla atmosférica.

La altura de la pluma del penacho puede estar por encima de la altura de mezcla atmosférica o por debajo.

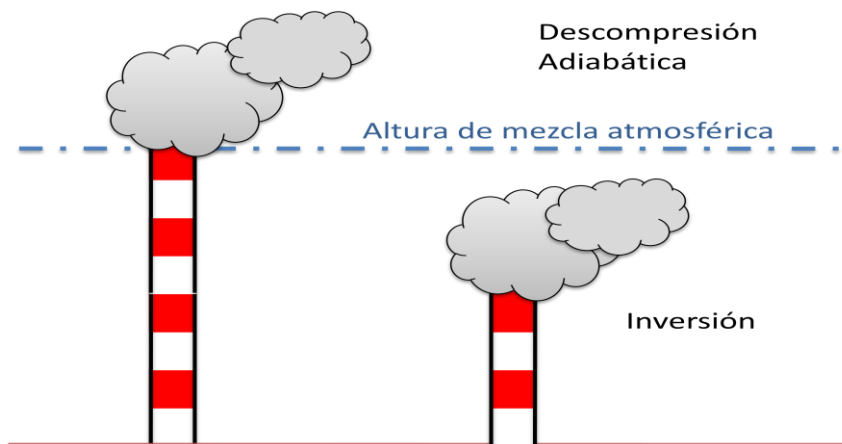


Figura 43: Altura de mezcla atmosférica

- Por encima de la altura de mezcla atmosférica

En este caso, se produce una descompresión adiabática y los contaminantes estarán confinados en la capa elevada no dispersándose a nivel del terreno.

- Por debajo de la altura de mezcla atmosférica

En este caso, los contaminantes no se dispersarán hacia arriba y estarán confinados dentro de la capa al nivel del terreno. Este efecto es adverso puesto que produciría una mala dispersión de contaminantes.

2.3.5. Inversión

La inversión térmica es un fenómeno producido por la diferencia de densidad del aire a lo largo del día, así pues, como el aire frío es más denso que el aire caliente, el aire frío de la montaña baja por las laderas hasta el valle y el aire caliente en el valle asciende. En las primeras horas de la mañana, después de que el aire frío haya llenado el valle teniendo el aire caliente encima, la atmósfera está muy estable porque el aire denso frío está debajo del aire caliente menos denso.

Este fenómeno puede confinar los contaminantes al nivel del terreno. En algunos casos, estas inversiones pueden persistir durante días. Una inversión es esencialmente lo mismo que una altura de mezcla atmosférica baja.



2.3.6. Movimiento de los penachos

Clasificación de los diferentes movimientos de los penachos:

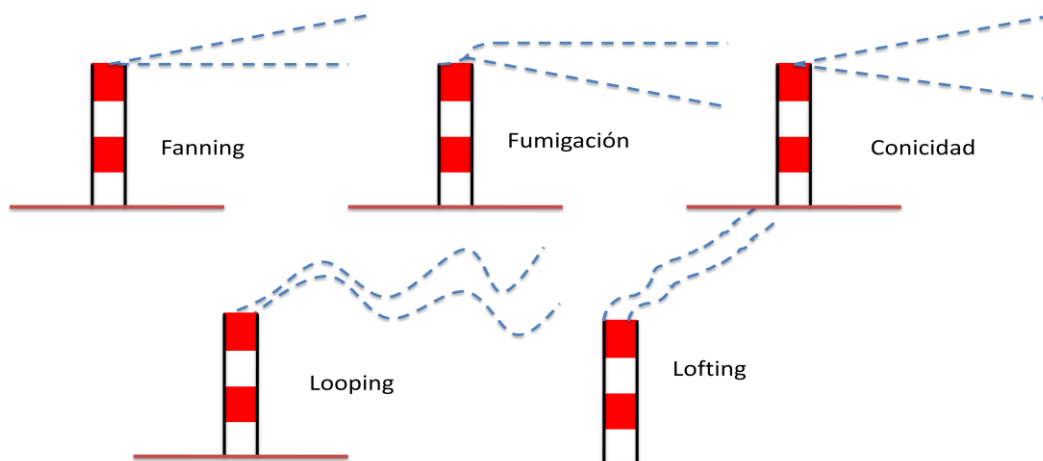


Figura 44: Clasificación de los diferentes movimientos de los penachos

Fanning: La pluma tiene una gran dispersión horizontal y poca verticalmente. Esto suele ocurrir de noche en una atmósfera muy estable y vientos débiles variables. Desarrollo estable.

Fumigación: Se produce cuando la pluma cae rápidamente al suelo debido a la baja altura de mezcla atmosférica. Esta situación se suele producir poco después de la salida

del sol debido al calentamiento del suelo. Poco a poco este calentamiento es sustituido por una capa inestable que crece hasta la parte superior de la pluma. Esta condición es generalmente de corta duración, pero los resultados se ven reflejados en concentraciones más altas en el nivel del suelo.

Looping: Se da en condiciones muy inestables y por convección durante el mediodía y por la tarde. Grandes remolinos de convección toman el penacho de humo provocando sucesivos movimientos hacia arriba y hacia abajo. Desarrollo inestable.

Conicidad: La pluma se parece a un cono, tanto en la horizontal y como en vertical. Esto generalmente se produce en condiciones de nubes y viento. Desarrollo neutra.

Lofting: La pluma se mantiene por encima de la superficie de la inversión. Ocurre poco después de la transición de las condiciones de inestabilidad a estabilidad. La pluma se puede ser bastante delgada o gruesa. Dependiendo de la altura que tome y cuánto ascienda por encima de la capa de inversión. Este desarrollo del penacho puede ser transitorio o persistir durante varias horas.

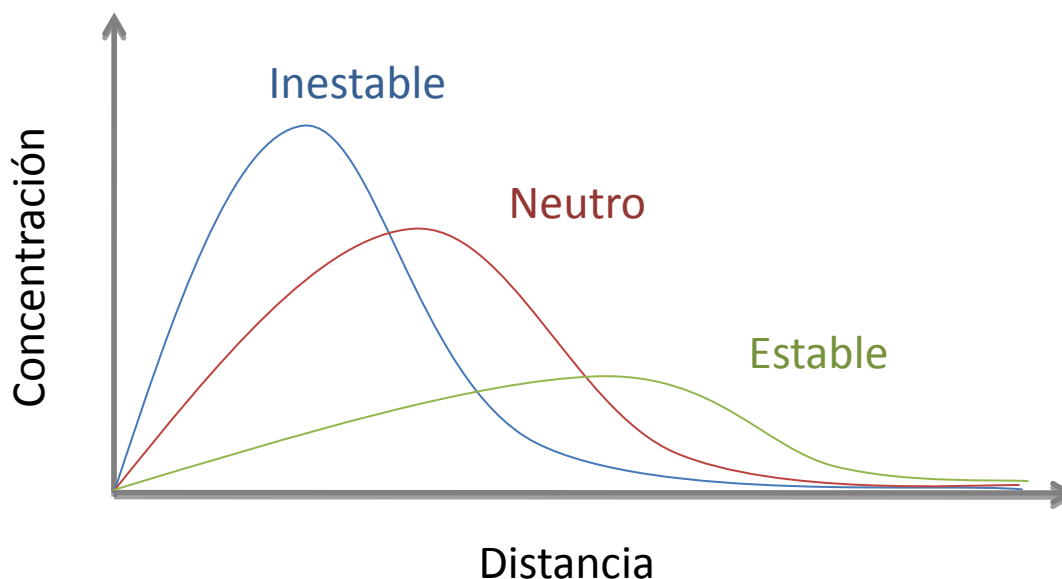



Figura 45: Concentración de contaminantes en función de la posición, según tenga el penacho desarrollo estable, inestable o neutro.

Si el desarrollo del penacho es inestable la concentración de contaminantes se centrará en las proximidades de la chimenea, al contrario del desarrollo del penacho estable, que facilitara la dispersión de los contaminantes mayores distancias.

2.3.7. Efecto Downwash

Una pluma generada en una chimenea corta situada enfrente de un edificio u otra elevación del terreno puede ser empujada hacia el terreno por el flujo descendente del viento. Al soplar el viento encima de este obstáculo, el aire por el lado del obstáculo donde está soplando el viento asciende y fluye sobre la cumbre de éste. En el lado contrario, el aire desciende para volver al nivel del terreno. Este es el fenómeno conocido como downwash. Cuando esto ocurre, la altura final de la pluma estará muy cerca del nivel del terreno y, por tanto, las concentraciones de contaminantes serán mucho mayores que si se hubiera evitado el downwash construyendo una chimenea más alta. Experimentos en el túnel del viento han demostrado que es probable que ocurra ese downwash si la chimenea está a menos de 2.5 veces la altura del obstáculo. Además de la altura de la chimenea, un factor crítico que afecta el downwash de una pluma es la velocidad de salida de los gases. Se ha determinado que si ésta es 1.5 veces menor que la velocidad del viento circundante se producirá el citado fenómeno.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

2.3.8. Resumen de los aspectos que afectan a la dispersión

Dispersión		
	Beneficia	Perjudica
Viento	Cambios en la dirección	Ausencia de viento
Estabilidad Atmosférica	Inestable	Estable
Topografía	Ausencia de obstáculos	Obstáculos
Altura de mezcla atmosférica	Pluma por encima de la altura de mezcla atmosférica	Pluma por debajo de la altura de mezcla atmosférica
Inversión Térmica	No	Si
Movimiento de penacho	Desarrollo estable	Desarrollo inestable
Efecto Downwash	No	Si

Tabla 35: Resumen de los diferentes aspectos que afectan a la dispersión



3. MODELO ISC3

3.1. Introducción

Los contaminantes emitidos a la atmósfera por la chimenea son transportados en la dirección del viento predominante y dispersándose por las turbulencias y movimientos perpendiculares del viento.

En este proyecto se va a presentar una estimación de la dispersión para comprobar el impacto medioambiental de la planta. La estimación se realizará mediante una predicción de la concentración de contaminantes en la zona que rodea al punto de emisión aplicando el modelo Gaussiano de dispersión que permite calcular las concentraciones de un contaminante a nivel del suelo.

3.2. Descripción

El modelo de dispersión atmosférico ISC3 (Industrial SourceComplex 3) lo desarrolló la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (US-EPA) y se mantiene vigente en la actualidad. El modelo ISC3 simula la dispersión en la atmósfera de contaminantes emitidos por las fuentes industriales y predice el promedio anual de las concentraciones del contaminante a nivel del terreno. El modelo permite evaluar el transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos.

El modelo ISC3 es un modelo simplificado ya que evalúa la dispersión estadísticamente basándose en parámetros medidos en los estudios de campo. Para realizar el cálculo más preciso sería necesario utilizar los principios físicos de mecánica de fluidos para calcular la turbulencia atmosférica basada en el calentamiento por la radiación solar, velocidad del viento, rugosidad del terreno, y otros factores, todos esto necesitaría una cantidad excesiva de datos de entradas y programas informáticos.

El modelo de ISC3 es un modelo de pluma de Gauss de dispersión que asume las concentraciones del contaminante en la pluma (verticalmente y lateralmente) pueden representarse por curvas basadas en la función estadística de distribución normal (o distribución de Gauss).

El modelo Gaussiano de penacho de humo tiene las siguientes consideraciones:

- La velocidad de dispersión de los contaminantes es inversamente proporcional a la velocidad del viento.
- Las concentraciones de contaminantes emitidas son proporcionales al caudal de emisión.
- Las concentraciones de contaminantes tanto en la dirección del viento como en la vertical en las zonas próximas a la fuente siguen una distribución Gaussiana.



- Debido a las limitaciones del modelo ICS3, no podemos analizar una distancia mayor a 50 km.

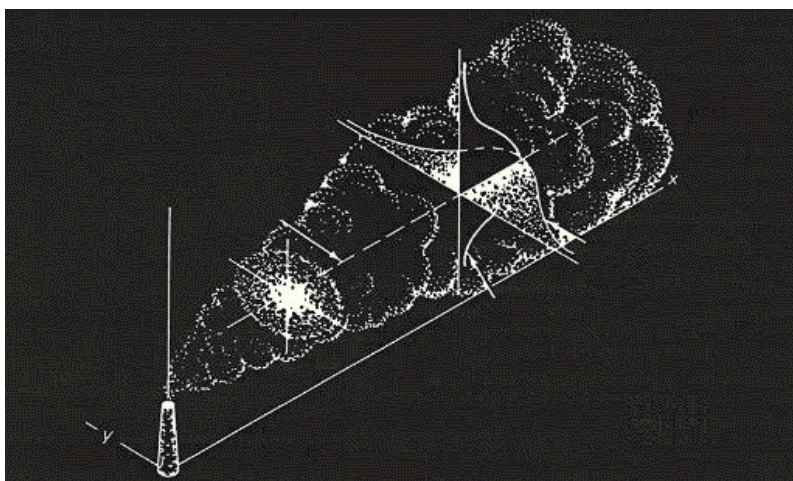


Figura 46: Modelo Gaussiano

En la figura del modelo Gaussiano podemos observar que cuanto más se aleja el penacho en dirección del viento las curvas verticales y laterales se van volviendo más planas, esto quiere decir que cuanto más nos alejemos de la chimenea el penacho se ensanchará más.

3.3. Ecuación general

La ecuación general del modelo Gaussiano para la medida de la contaminación en cualquier punto es la siguiente:

$$\chi = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-0.5 \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right) \left[\exp\left(-0.5 \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left[-0.5 \left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right]$$

El modelo nos permite introducir las condiciones meteorológicas (clase de estabilidad según las categorías definidas por Pasquill y Fifford), la intensidad del viento y la temperatura, entre otros muchos factores. Para ello se utilizará el modelo Gaussiano simplificado ISC3.

$$\chi = \frac{QVD}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-0.5 \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)$$



Donde:

χ : Concentración de contaminantes a una distancia x e y .

Q : Flujo másico de contaminante.

D : Término de agotamiento o eliminación del contaminante por reacción química u otros procesos físicos.

u : Velocidad media del viento en el punto de emisión.

V : Término de distribución vertical del contaminante.

σ_z : Desviación estándar vertical de las distribuciones de concentración.

σ_y : Desviación estándar lateral de las distribuciones de concentración.

y : Distancia al receptor en la coordenada Y .

Los datos de entrada para la realización del modelo ISC3 son:

Parámetro	Valor
Altura de chimenea	40 m
Diámetro de salida chimenea	3 m
Velocidad de salida de los gases	12 m/s
Temperatura de salida de los gases	473 K
Temperatura atmosférica	298 K
Gradiente potencial de temperatura	$\frac{\Delta\theta}{\Delta z}=0,0078$ K/m

Tabla 36: Parámetros de entrada en el modelo ISC3



3.3.1. Metodología

En la siguiente figura se mostrará la metodología empleada para resolver el modelo ISC3, la cual se desarrollará en profundidad en el anexo I.

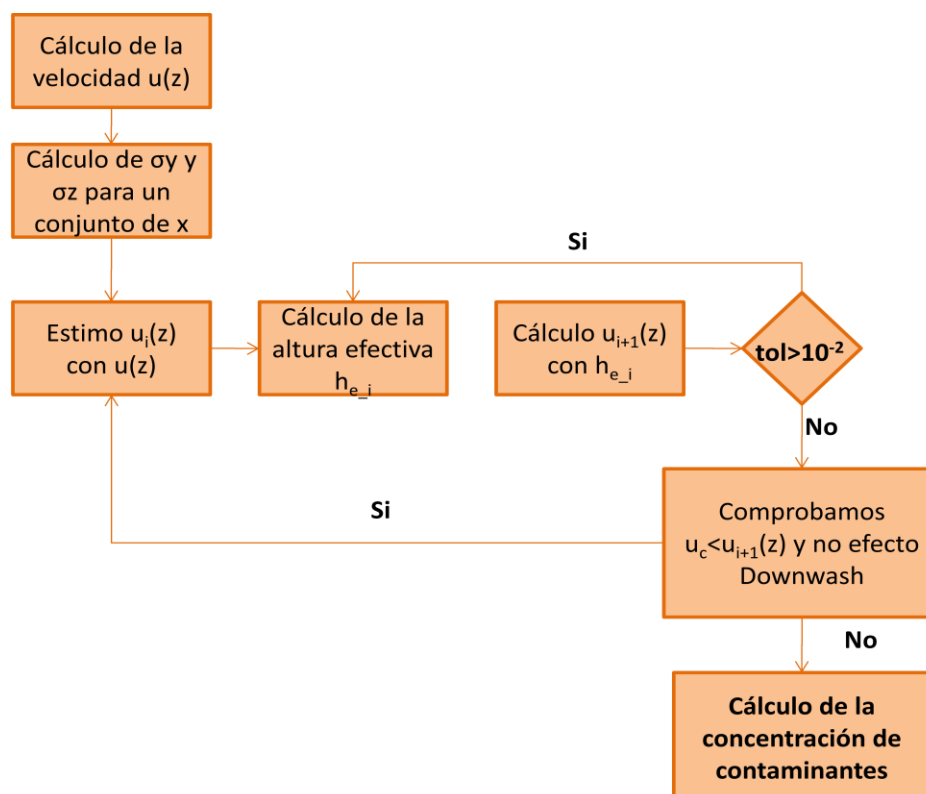


Figura 47: Metodología ISC3

Donde la tolerancia es:

$$tol = \frac{u_{i+1} - u_i}{u_{i+1}}$$



3.3.2. Velocidad del viento

El dato de la velocidad del viento se ha obtenido ponderando el viento medio de un año en las proximidades de la planta, para obtener un valor lo más real posible. La forma de obtener datos de casi todas las bases de datos de viento es a una altura de 10 m, por lo que deberemos calcular la velocidad que habrá a la salida de la chimenea mediante la siguiente ecuación:

$$u(z) = u(z_0) \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^p$$

Donde:

$u(z)$: Velocidad del viento a la altura de la chimenea. [m/s]

$u(z_0)$: Velocidad del viento a 10 m de altura. [m/s]

z : Altura de la chimenea. [m]

z_0 : Altura a la que se han tomado los datos de velocidad de viento. [m]

p : Parámetro adimensional que depende de la estabilidad de la zona. []

El parámetro adimensional p se determina en función de las condiciones de estabilidad y atendiendo a la zona en que nos encontramos.

Estabilidad según Pasquill	Medio rural	Medio urbano
A	0.08	0.17
B	0.09	0.17
C	0.11	0.20
D	0.16	0.27
E	0.32	0.38
F	0.54	0.61

Tabla 37: Determinación del parámetro p

Para realizar un estudio conservador consideraremos una estabilidad según Pasquill tipo E (atmósfera ligeramente estable) y una zona rural, por lo que, el parámetro obtenidose el siguiente:

$$p = 0.32$$

La velocidad a la altura de la chimenea es:

$$u(z)=7,8 \text{ m/s}$$



3.3.3. Dispersión lateral y vertical de la columna de gases

La dispersión lateral y vertical nos indica la extensión de la pluma al moverse a favor del viento. Estos valores los obtendremos mediante las ecuaciones de Pasquill y Gifford de la dispersión lateral y vertical. Estas ecuaciones han sido obtenidas mediante extensas pruebas en campo para probar la dispersión de las plumas.

$$\sigma_y = 465.11628 \cdot x \cdot \tan(TH)$$

$$TH = 0.017453293(c - \ln(x))$$

Donde:

x: Distancia al punto donde se calcula la dispersión. [km]

c: Parámetro adimensional. []

d: Parámetro adimensional. []

El parámetro adimensional *c* y *d* se determina en función de las condiciones de estabilidad de la zona en que nos encontramos.

Estabilidad según Pasquill	c	d
A	24.167	2.5334
B	18.333	1.8096
C	12.5	1.0857
D	8.333	0.72382
E	6.25	0.54287
F	4.1667	0.36191

Tabla 38: Determinación del parámetro *c* y *d*


Siguiendo con la suposición conservadora de atmósfera ligeramente estable obtenemos:

$$C=6.25$$

$$D=0.54287$$

La dispersión vertical la obtendremos con una ecuación parecida:

$$\sigma_z = a \cdot x^b$$

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Los parámetros a y b están tabulados en el modelo de PasquillGifford y son los siguientes:

Estabilidad según Pasquill	x [km]	a	b
E	<0.10	24.260	0.83660
	0.10-0.30	23.331	0.81956
	0.31-1.00	21.628	0.75660
	1.01-2.00	21.628	0.63077
	2.01-4.00	22.534	0.57154
	4.01-10.00	24.703	0.50527
	10.01-20.00	26.970	0.46713
	20.01-40.00	35.420	0.37615
	>40.00	47.618	0.29592

Tabla 39: Parámetros a y b

3.3.4. Altura efectiva

El modelo Gaussiano ISC3 se basa en la hipótesis de que el penacho de humo se estabiliza cuando alcanza la denominada altura efectiva, h_e . Esta altura efectiva es la suma de la altura geométrica (corregida o no) de la chimenea más un incremento gracias al cual consigue la estabilidad.

$$h_e = h_s + \Delta h$$

Primero deberemos saber si es necesario corregir la altura de chimenea debido al efecto Downwash anteriormente mencionado.

Habrá efecto Downwash si la velocidad de salida de los humos por la chimenea, v_s es inferior a 1.5 veces la velocidad del viento circundante.

Se produce Downwash	Altura de chimenea corregida
$v_s < 1.5 \cdot u \rightarrow$ Sí	$h_s' = h_s + 2 \cdot d_s \cdot \left[\frac{v_s}{u} - 1.5 \right]$
$v_s > 1.5 \cdot u \rightarrow$ No	$h_s' = h_s$

Tabla 40: Altura de la chimenea

Una vez obtenida ya la altura corregida (h_s') solo nos falta conocer Δh que se obtendrá mediante factores meteorológicos, para calcular la altura efectiva h_e :

Como las condiciones atmosféricas son estables, el factor determinante será la velocidad crítica de distinción del viento. Si el viento que sopla en las inmediaciones de nuestra planta supera la velocidad crítica de distinción, se puede concluir con la solución de condiciones



atmosféricas estables con viento. En caso contrario nos encontramos en atmósfera estable sin viento.

Condiciones atmosféricas estables	
Velocidad crítica de distinción $u_c = 0.2746F^{1/4}S^{1/8}$	
Con viento	Sin viento
$h_e = h_s' + 2.6 \left(\frac{F}{uS} \right)^{1/3}$	$h_e = h_s' + 4F^{1/4}S^{-3/8}$

Tabla 41: Altura efectiva

Donde:

S : Parametro de estabilidad: $s = \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta z} \right) \cdot \frac{g}{T}$

T : Temperatura del ambiente circundante a la chimenea.

$\frac{\Delta\theta}{\Delta z}$: Gradiente potencial de temperatura.

F : Parámetro de flotación de la columna de humo: $F = \frac{g \cdot v_s \cdot d_s^2 \cdot (T_s - T)}{4 \cdot T_s}$

d_s : Diametro de la chimenea de salida de los gases.

T_s : Temperatura de salida de los gases de escape.

3.3.5. Término de distribución vertical del contaminante

El modelo ISC3 simplifica este efecto, por lo que, considera la dispersión sin restricciones en la dirección vertical, quedando el término V, de la siguiente manera:


$$V = \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{Z_r - h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{Z_r + h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

Donde:

Z_r : Coordenada de altura, del relieve del terreno en el punto a calcular.

h_e : Altura efectiva del penacho de humo.

Esta simplificación se lleva a cabo para reducir la estimación de la altura de mezcla, mediante modelos complejos y largas formulaciones.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

3.3.6. Término de agotamiento o eliminación del contaminante por reacción química u otros procesos físicos

La segunda y última simplificación al modelo ISC3 es la consideración de que no se producen reacciones químicas u otros procesos de eliminación secundaria considerando por tanto el término de agotamiento o eliminación igual a uno.



4. EMISIONES DE CONTAMINANTES EN LA PLANTA DE BIOMASA

Para poder realizar el estudio de impacto medioambiental se han recogido los datos de las emisiones típicas de residuos de madera para la combustión en caldera, obtenidas de Emission Factor.

Contaminante	Emisión
NO_x	0.49 lb/MMbtu
SO₂	0.025 lb/MMbtu
CO	0.6 lb/MMbtu
CO₂	195 lb/MMbtu

Tabla 42: Emisiones procedentes de Emission Factor[26]

Cabe destacar que aunque se recoge en Emission Factor los valores de CO y CO₂ como emisiones de la biomasa, no los tendremos en cuenta. La caldera realiza una combustión completa por lo que el CO final es nulo. El CO₂ no lo consideraremos como una emisión perjudicial para el medio ambiente debido al ciclo neutro del CO₂ que tiene la biomasa.



5. VALORES LÍMITE PERMITIDOS PARA LA PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

A continuación indicaremos los valores límite permitidos por el Real Decreto 102/2011 de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, el cual sustituyó al anterior *Real Decreto 1073/2002, de 18 de octubre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiental en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxido de nitrógeno, partículas, plomo benceno y monóxido de carbono*, que tuvo vigencia hasta el 30 de enero de 2011.

Los valores límite permitidos se encuentran en el Anexo I del Real decreto 102/2011 de 28 de enero, publicados en el Boletín Oficial del Estado (B.O.E.) en el número 25 del Sábado 29 de enero 2011, en la sección I página 9595.

Como hemos indicado anteriormente, solo presentaremos el estudio de impacto medioambiental con los contaminantes NO_x y SO_2 , por lo que, solo nos interesa los valores límite del anexo I del Real Decreto 102/2011 que hagan referencia al NO_x y SO_2 .

5.1. Valores límite de SO_2

Los valores límite y el nivel crítico se expresarán en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El volumen debe ser referido a una temperatura de 293 K y a una presión de 101,3 kPa.

	Período de promedio	Valor
Valor límite horario	1 hora	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ valor que no podrá superarse en más de 24 ocasiones por año civil.
Valor límite diario	24 horas	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ valor que no podrá superarse en más de 3 ocasiones por año civil.
Nivel crítico	Año civil e invierno (del 1 de octubre al 31 de marzo)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 43: Valores límite SO_2 [27]



5.2. Umbral de alerta del SO₂

El valor correspondiente al umbral de alerta del dióxido de azufre se sitúa en 500 µg/m³

Se considerará superado cuando durante tres horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora, en lugares representativos de la calidad del aire en un área de, como mínimo, 100 km² o en una zona o aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.

5.3. Valores límite de NO_x

Los valores límite y el nivel crítico se expresarán en µg/m³. El volumen debe ser referido a una temperatura de 293 K y a una presión de 101,3 kPa.

	Período de promedio	Valor
Valor límite horario	1 hora	200 µg/m ³ de NO _x que no podrá superarse en más de 18 ocasiones por año civil.
Valor límite anual	1 año civil	40 µg/m ³ de NO _x
Nivel crítico	1 año civil	30 µg/m ³ de NO _x

Tabla 44: Valores límite NO_x[27]

5.4. Umbral de alerta del NO_x

El valor correspondiente al umbral de alerta de los óxidos de nitrógeno se sitúa en 400 µg/m³

Se considerará superado cuando durante tres horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora, en lugares representativos de la calidad del aire en un área de, como mínimo, 100 km² o en una zona o aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.



6. NIVELES DE CONTAMINACIÓN ACTUALES

Para obtener resultados concluyentes del estudio de impacto medioambiental necesitamos saber cuál es el nivel de contaminación de las ciudades actualmente para así poder ver el efecto directo de los contaminantes procedentes de la planta de biomasa. Para ello se presenta un estudio de las ciudades más importantes de la Comunidad Autónoma de Galicia, para obtener un valor medio de contaminación del aire dentro de las ciudades.

Los datos han sido recogidos de la Conselleria de Medio Ambiente de Galicia, y han sido tratados para obtener los valores medio de cada contaminante.

6.1. Santiago de Compostela

Santiago de Compostela se encuentra a 24,5 kilómetros de la planta. Tiene aproximadamente 95.200 habitantes, es la capital de la Comunidad Autónoma de Galicia, pertenece a la provincia de A Coruña, por lo que es una de las ciudades más importantes de la Comunidad Autónoma de Galicia. Los datos de niveles de contaminación se han recogido en la estación Campus, ubicada en el campus universitario de la Universidad de Santiago de Compostela y los valores obtenidos son los siguientes:

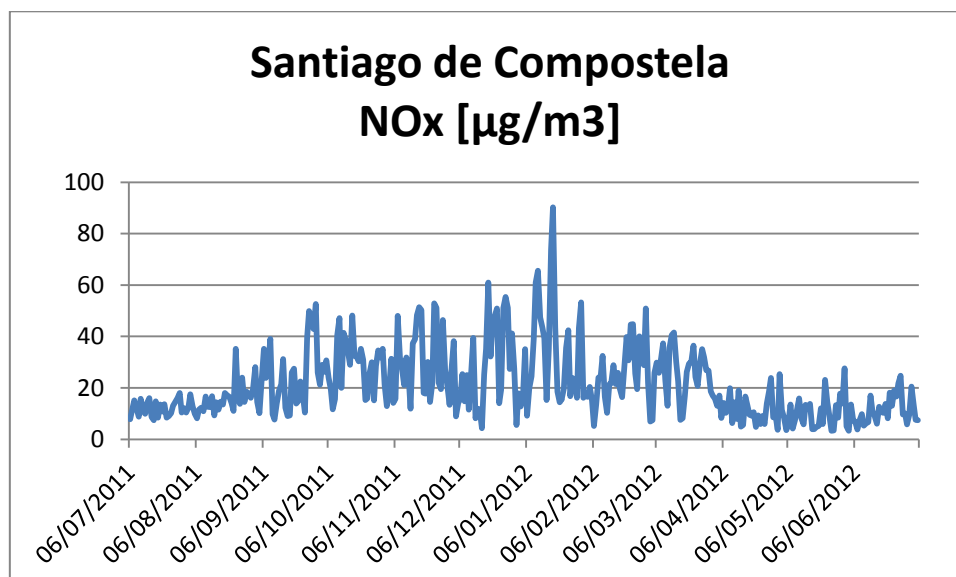


Figura 48: Nivel de NOx en Santiago de Compostela[22]

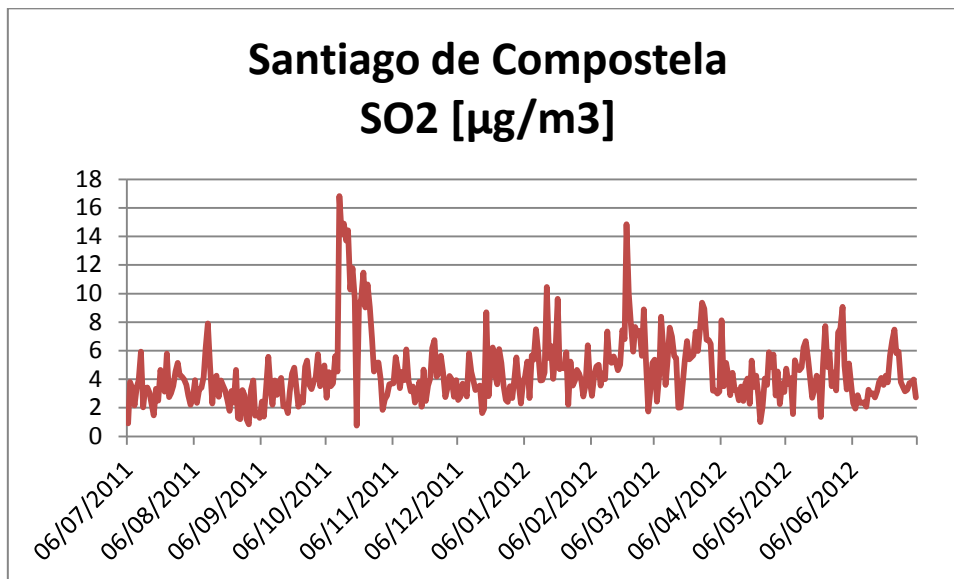


Figura 49: Nivel de SO₂ en Santiago de Compostela[22]

Los valores medio son:

- Nivel de contaminación de SO₂ 4,5 µg/m³
- Nivel de contaminación de NO_x 21,14 µg/m³

Los valores máximos son:

- Nivel máximo de contaminación de SO₂ 16,84 µg/m³ el día 12-10-2011
- Nivel máximo de contaminación de NO_x 90,2 µg/m³ el día 18-1-2012

Podemos observar que los valores medios de contaminación de Santiago de Compostela son inferiores a los niveles críticos marcados en el Real Decreto 102/2011 de 28 de enero.

En ningún día se supero el valor límite diario y tampoco el umbral de alarma.

6.2. A Coruña

A Coruña se encuentra a 60 kilómetros aproximadamente de la planta. Tiene aproximadamente 246.028 habitantes, es la capital de la provincia homónima y además una de las ciudades más importantes de la Comunidad autónoma de Galicia. Los datos de niveles de contaminación se han recogido de las estaciones A Coruña y Torre de Hércules, encontrándose la primera en el área urbana de la ciudad y la segunda ubicada en la Torre de Hércules y los valores obtenidos son los siguientes:

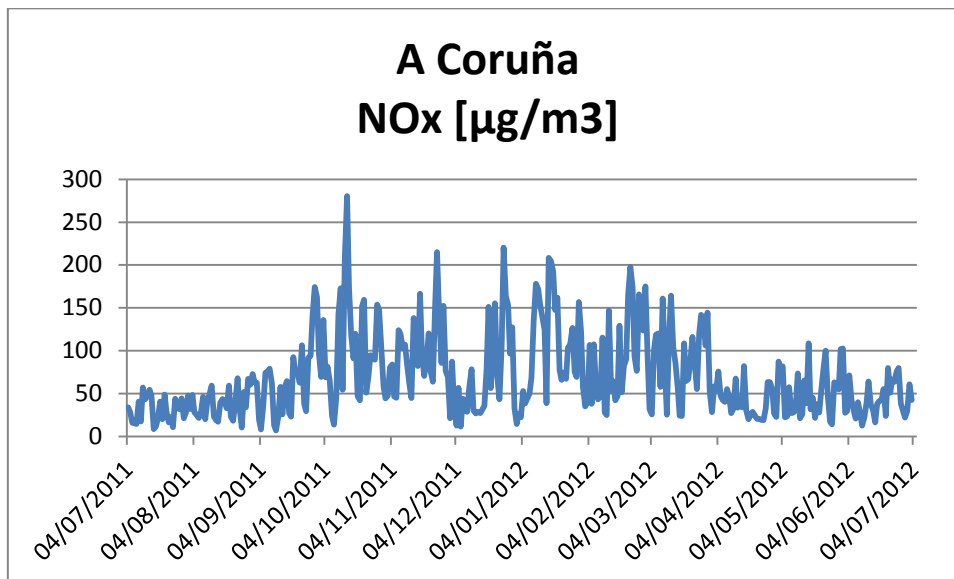


Figura 50: Nivel de NOx en A Coruña[22]

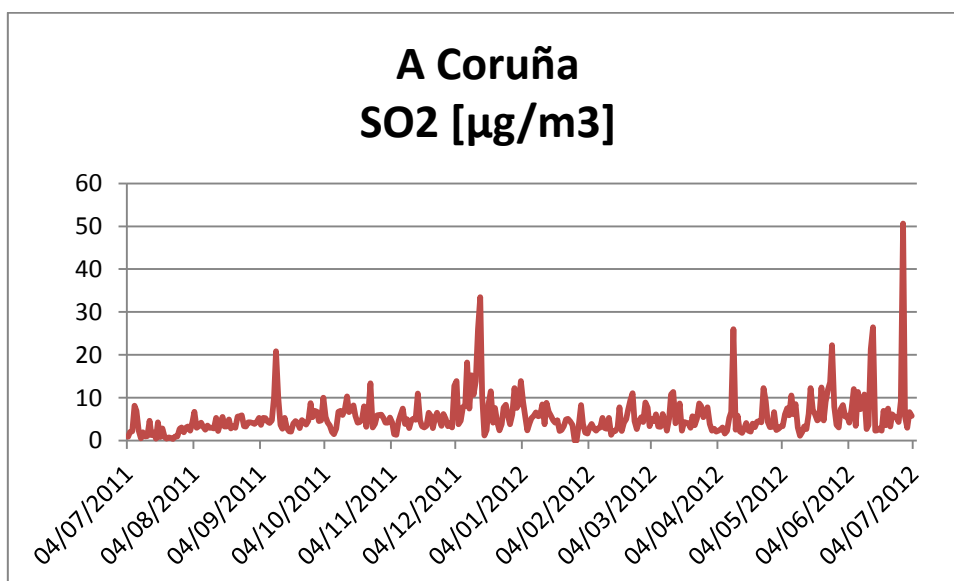



Figura 51: Nivel de SO2 en A Coruña[22]

Los valores medio son:

- Nivel de contaminación de SO₂ 5,5 µg/m³
- Nivel de contaminación de NO_x 68,6 µg/m³

Los valores máximos son:

- Nivel máximo de contaminación de SO₂ 50,61 µg/m³ el día 29-6-2012
- Nivel máximo de contaminación de NO_x 280,64 µg/m³ el día 14-10-2011

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Podemos observar que los valores medios de contaminación de A Coruña son inferiores a los niveles críticos marcados en el Real Decreto 102/2011 de 28 de enero, solo en el SO₂, el NO_x supera los niveles críticos pero no los valores horarios.

Aun así, en A Coruña, el valor límite horario de NO_x se ha superado en seis ocasiones, sin llegar alcanzar el umbral de alarma.

6.3. Valor de referencia

Finalmente observando los valores obtenidos de algunas de las ciudades más importantes de la Comunidad Autónoma de Galicia y fijándonos en el número de habitantes, es más preciso aproximar el nivel de calidad del aire de Santiago de Compostela a las ciudades bajo este estudio, que usar A Coruña como referencia debido a la gran diferencia que hay de población urbana y debido a la gran distancia que existe entre A Coruña y las ciudades bajo este estudio.



7. RESULTADOS

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos del estudio de impacto medioambiental, mediante el modelo ISC3 para 4 poblaciones próximas a la planta las cuales son:

Ciudad	Escudo
Val do Dubra	
Santa Comba	
Coristanco	
Tordoia	


Tabla 45: Ciudades próximas a la planta

Cada estudio de impacto medioambiental estará formado por una figura que indique la ubicación exacta de la población respecto a la planta, una figura que muestre el perfil orográfico entre la población y la planta y finalmente una figura que nos mostrará la evolución de los contaminantes con la distancia.

El desarrollo completo de todos los cálculos se recoge en el Anexo I

7.1. Impacto medioambiental en Val do Dubra

En primer estudio de impacto medioambiental será sobre Val do Dubra, que tiene una población próxima a los 4.500 habitantes.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Su ubicación respecto a la planta es la siguiente.



Figura 52: Ubicación de Val do Dubra respecto a la planta de biomasa. (Distancia 6.6 km)[19]

Para el estudio de la dispersión de contaminantes es necesario conocer la orografía del lugar, por eso, mediante programas que calculan la orografía de rutas se ha obtenido la orografía aproximada entre la planta de biomasa y la población de Val do Dubra.

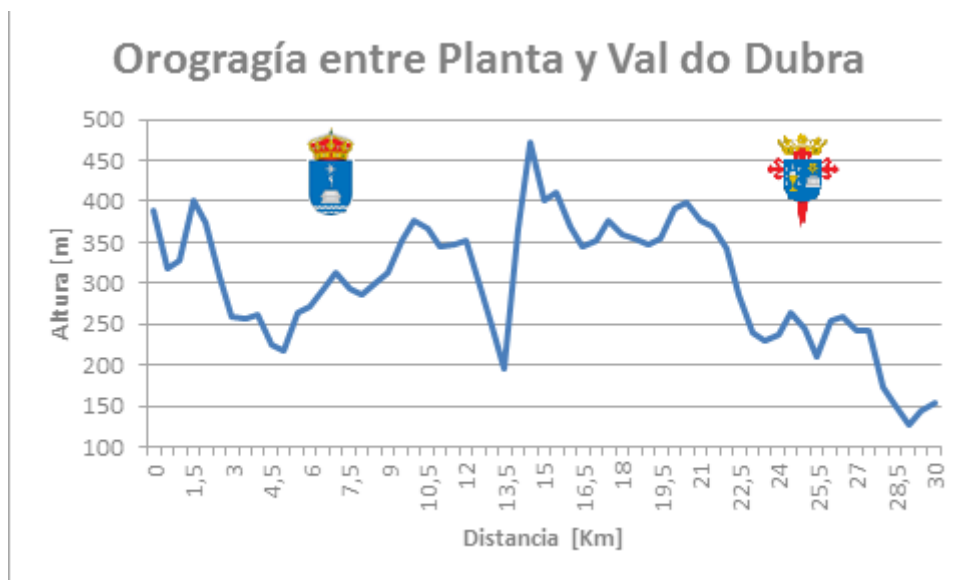


Figura 53: Orografía entre la Planta y Val do Dubra.

Podemos observar que entre la Planta de biomasa y Val do Dubra la orografía es bastante irregular (sube y baja constantemente), lo que no generara acumulación de contaminantes en las laderas.



Los resultados obtenidos con el modelo ISC3 se representan en las siguientes curvas.

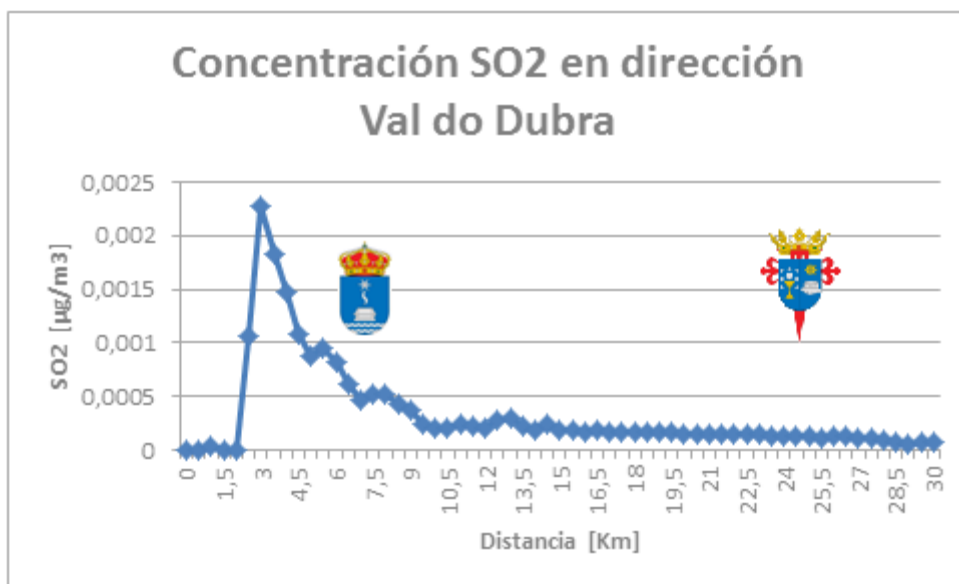


Figura 54: Evolución de SO₂ con la distancia.

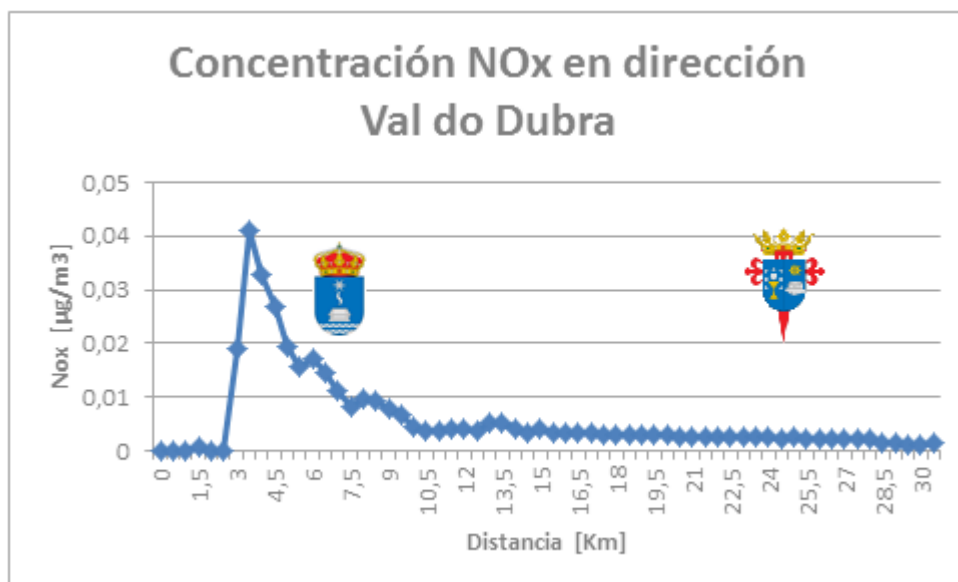



Figura 55: Evolución de NO_x con la distancia.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

En relación al comportamiento de las curvas que muestran los resultados del modelo de dispersión (Figuras 54 y 55), señalar que debido a que el modelo ISC3 estima el nivel de concentración de contaminante a nivel del suelo, una característica común a todos los resultados es que la contaminación en la base de la central resulta nula o cercana a cero en todos los casos (no downwash). Así, el penacho de humo al salir de la chimenea no toca el suelo y por tanto, hasta que no se desarrolla y se produce una dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea, no se registran indicios de contaminación.

Otra característica de las curvas es su tendencia, siempre comienza con niveles de concentración de contaminantes a nivel del suelo próximo a cero para posteriormente subir exponencialmente durante pocos kilómetros para luego caer hasta valores próximos a cero nuevamente. Cabe destacar que las dos curvas de concentración de contaminantes son iguales, ya que lo único que varía entre ellas es la concentración de contaminantes.

A continuación podemos analizar el estudio del impacto medio ambiental en la dirección hacia la ciudad Val do Dubra, para ello tomaremos los niveles de contaminación del aire de Santiago de Compostela y los supondremos de Val do Dubra, (hipótesis conservadora ya que Val do Dubra tiene un 5% de la población de Santiago de Compostela).

Los valores máximos obtenidos debido a las emisiones de la chimenea son:

- Nivel máximo de contaminación de SO_2 $0,0022 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.
- Nivel máximo de contaminación de NO_x $0,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.

Puntos de interés:

- Val do Dubra (6,6 km)
 - Nivel de contaminación de SO_2 $0,000624 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.
 - Nivel de contaminación de NO_x $0,01123 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.
- Santiago de Compostela (24,5 km)
 - Nivel de contaminación de SO_2 $0,000137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.
 - Nivel de contaminación de NO_x $0,002468 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.

Se puede observar como era de esperar, el nivel de contaminantes va decreciendo con la distancia, debido a la dispersión.

Finalmente calcularemos el incremento del nivel de contaminantes en los puntos de interés antes mencionados para ver el efecto de la planta de biomasa sobre ellos.

- Val do Dubra
 - Incremento de 0,014% de SO_2
 - Incremento de 0,05% de NO_x
- Santiago de Compostela
 - Incremento de 0,003% de SO_2
 - Incremento de 0,012% de NO_x



Estos valores son despreciables comparados con los niveles de contaminación de la ciudad, por lo que el impacto medioambiental sobre la población es nulo.

7.2. Impacto medioambiental en Santa Comba

En primer estudio de impacto medioambiental será sobre Santa Comba, que tiene una población próxima a los 10.000 habitantes.

Su ubicación respecto a la planta es la siguiente.



Figura 56: Ubicación de Santa Comba respecto a la planta de biomasa. (Distancia 11.76 km)[19]

Para el estudio de la dispersión de contaminantes es necesario conocer la orografía del lugar, por eso, mediante programas que calculan la orografía de rutas se ha obtenido la orografía aproximada entre la planta de biomasa y la población de Santa Comba.

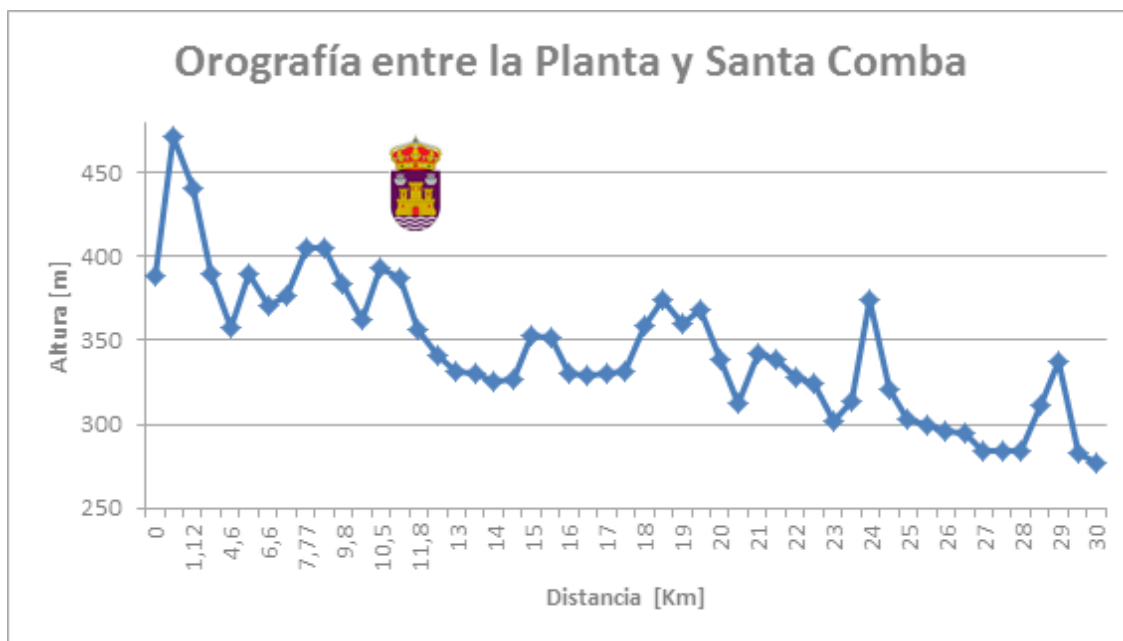


Figura 57: Orografía entre la Planta y Santa Comba.



Podemos observar que entre la Planta de biomasa y Santa Comba la orografía es bastante abrupta, lo que generara acumulación de contaminantes en las laderas.

Los resultados obtenidos con el modelo ISC3 se representan en las siguientes curvas.



Figura 58: Evolución de SO₂ con la distancia.

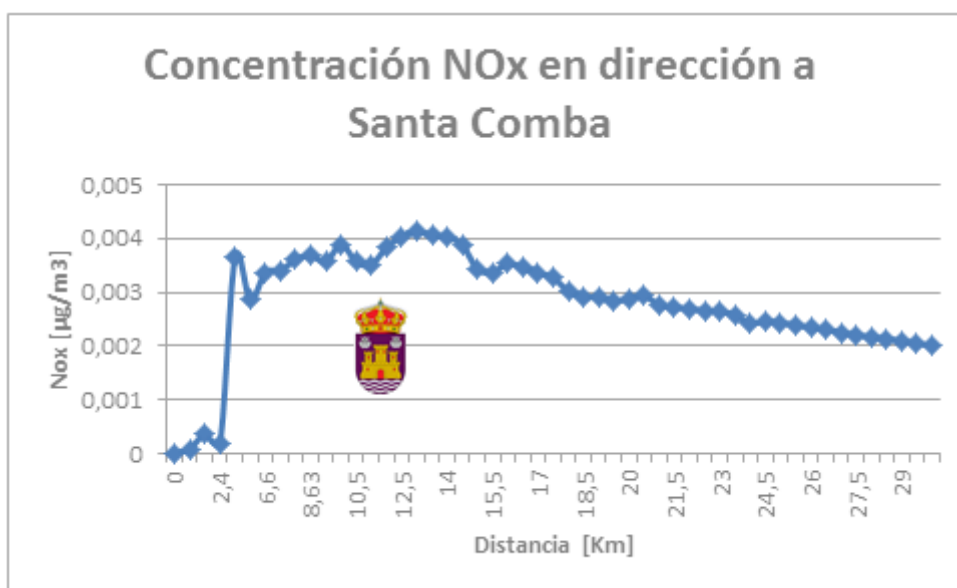



Figura 59: Evolución de NO_x con la distancia.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

En relación al comportamiento de las curvas que muestran los resultados del modelo de dispersión (Figuras 58 y 59), señalar que debido a que el modelo ISC3 estima el nivel de concentración de contaminante a nivel del suelo, una característica común a todos los resultados es que la contaminación en la base de la central resulta nula o cercana a cero en todos los casos (no downwash). Así, el penacho de humo al salir de la chimenea no toca el suelo y por tanto, hasta que no se desarrolla y se produce una dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea, no se registran indicios de contaminación.

En este caso el descenso del nivel de concentración de contaminantes no desciende tan rápido debido a la gran cantidad de laderas y terreno abrupto, que generan que los contaminantes se acumulen en ellas, como se indico anteriormente.

A continuación podemos analizar el estudio del impacto medio ambiental en la ciudad Santa Comba, para ello tomaremos los niveles de contaminación del aire de Santiago de Compostela y los supondremos de Santa Comba, (hipótesis conservadora ya que Santa Comba tiene un 10,5% de la población de Santiago de Compostela).

Los valores máximos obtenidos debido a las emisiones de la chimenea son:

- Nivel máximo de contaminación de SO₂ 0,00022 µg/m³ debido a la emisión.
- Nivel máximo de contaminación de NO_x 0,004 µg/m³ debido a la emisión.

Puntos de interés:

- Santa Comba (11,76 km)
 - Nivel de contaminación de SO₂ 0,000213 µg/m³ debido a la emisión.
 - Nivel de contaminación de NO_x 0,003835 µg/m³ debido a la emisión.


Finalmente calcularemos el incremento del nivel de contaminantes en los puntos de interés anteriormente mencionados para ver el efecto de la planta de biomasa sobre ellos.

- Santa Comba (11,76 km)
 - Incremento de 0,0047% de SO₂
 - Incremento de 0,018% de NO_x

Estos valores son despreciables comparados con los niveles de contaminación de la ciudad, por lo que el impacto medioambiental sobre la población es nulo.

7.3. Impacto medioambiental en Coristanco

En primer estudio de impacto medioambiental será sobre Coristanco, que tiene una población próxima a los 7.500 habitantes.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Su ubicación respecto a la planta es la siguiente.



Figura 60: Ubicación de Coristanco respecto a la planta de biomasa. (Distancia 14.45 km)[19]

Para el estudio de la dispersión de contaminantes es necesario conocer la orografía del lugar, por eso, mediante programas que calculan la orografía de rutas se ha obtenido la orografía aproximada entre la planta de biomasa y la población de Coristanco.

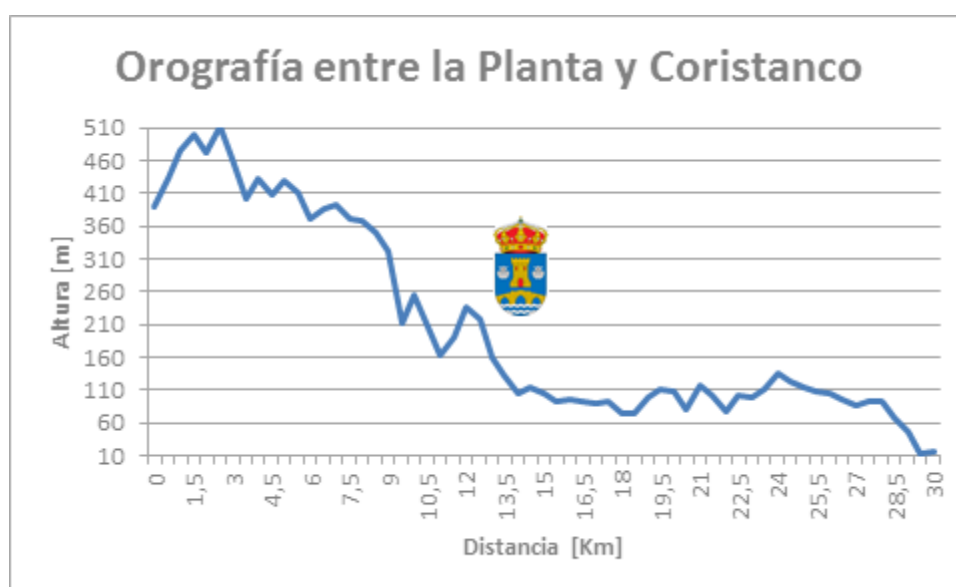




Figura 61: Orografía entre la Planta y Coristanco.

Podemos observar que entre la Planta de biomasa y Santa Comba la orografía es descendente, hasta llegar a un punto donde se hace casi plana, lo que generara un pico en el nivel de concentración de contaminantes.

Los resultados obtenidos con el modelo ISC3 se representan en las siguientes curvas.



Figura 62: Evolución de SO2 con la distancia.

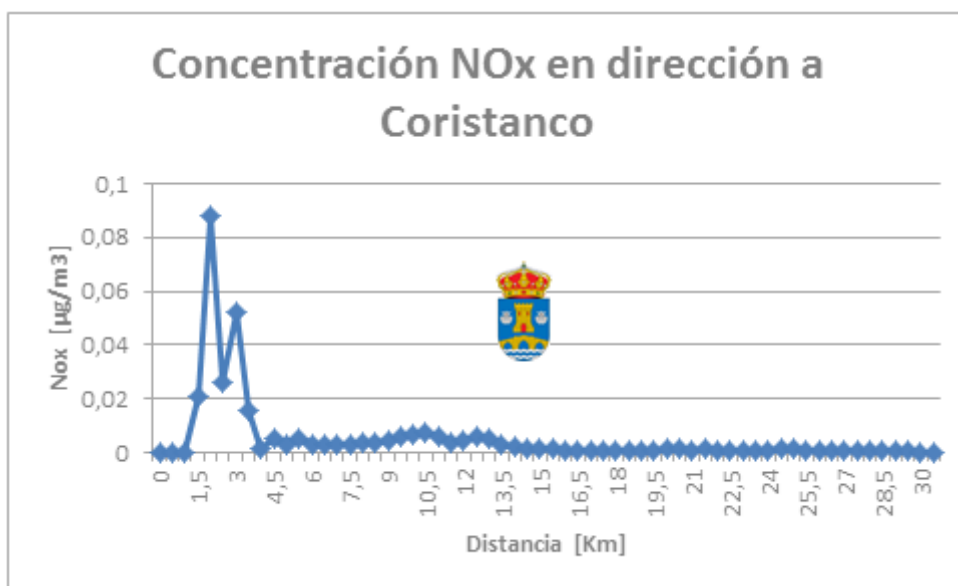



Figura 63: Evolución de NOx con la distancia.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

En relación al comportamiento de las curvas que muestran los resultados del modelo de dispersión (Figuras 62 y 63), señalar que debido a que el modelo ISC3 estima el nivel de concentración de contaminante a nivel del suelo, una característica común a todos los resultados es que la contaminación en la base de la central resulta nula o cercana a cero en todos los casos (no downwash). Así, el penacho de humo al salir de la chimenea no toca el suelo y por tanto, hasta que no se desarrolla y se produce una dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea, no se registran indicios de contaminación.

En este caso el pico del nivel de concentración de contaminantes a nivel del suelo tiene dos picos debido a las dos laderas que tiene muy pronunciadas y seguidas la orografía, para luego descender hasta valores próximos a cero como era de esperar.

Finalmente podemos analizar el estudio del impacto medio ambiental en la ciudad Coristanco, para ello tomaremos los niveles de contaminación del aire de Santiago de Compostela y los supondremos de Coristanco, (hipótesis conservadora ya que Coristanco tiene un 7,8% de la población de Santiago de Compostela).

Los valores máximos obtenidos debido a las emisiones de la chimenea son:

- Nivel máximo de contaminación de SO₂ 0,005 µg/m³ debido a la emisión.
- Nivel máximo de contaminación de NO_x 0,09 µg/m³ debido a la emisión.

Puntos de interés:

- Coristanco (14,45 km)
 - Nivel de contaminación de SO₂ 8,424e-5 µg/m³ debido a la emisión.
 - Nivel de contaminación de NO_x 0,001517 µg/m³ debido a la emisión.


Finalmente calcularemos el incremento del nivel de contaminantes en los puntos de interés antes mencionados para ver el efecto de la planta de biomasa sobre ellos.

- Coristanco (14,45 km)
 - Incremento de 0,0019% de SO₂
 - Incremento de 0,0072% de NO_x

Estos valores son despreciables comparados con los niveles de contaminación de la ciudad, por lo que el impacto medioambiental sobre la población es nulo.

7.4. Impacto medioambiental en Tordoia

En primer estudio de impacto medioambiental será sobre Tordoia, que tiene una población próxima a los 4.000 habitantes.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Su ubicación respecto a la planta es la siguiente.



Figura 64: Ubicación de Tordia respecto a la planta de biomasa. (Distancia 9.5 km)[19]

Para el estudio de la dispersión de contaminantes es necesario conocer la orografía del lugar, por eso, mediante programas que calculan la orografía de rutas se ha obtenido la orografía aproximada entre la planta de biomasa y la población de Tordoa.

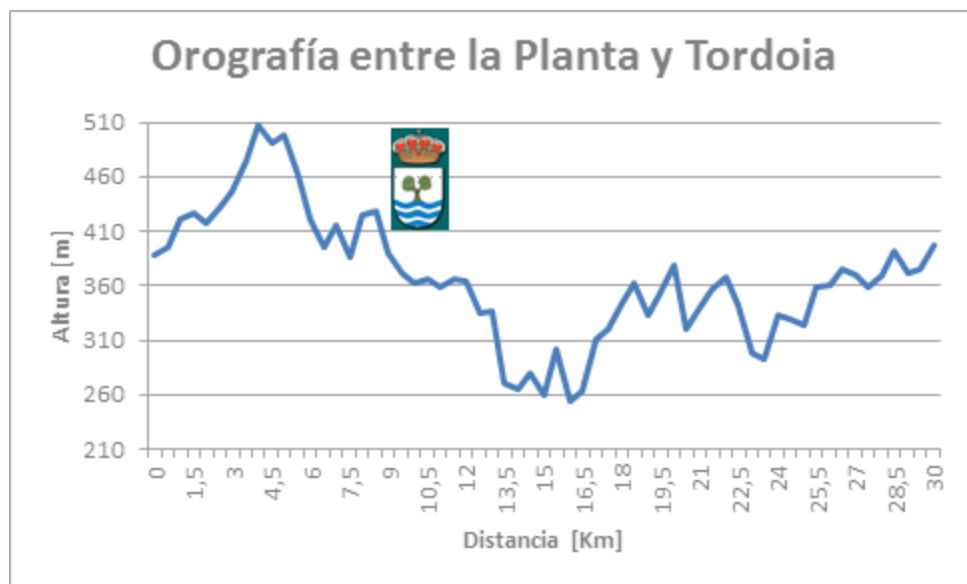


Figura 65: Orografía entre la Planta y Tordoa.

Podemos observar que entre la Planta de biomasa y Santa Comba la orografía asciende al principio para luego descender, hasta llegar a un punto donde se vuelve inestable al subir y bajar constantemente.

Los resultados obtenidos con el modelo ISC3 se representan en las siguientes curvas.

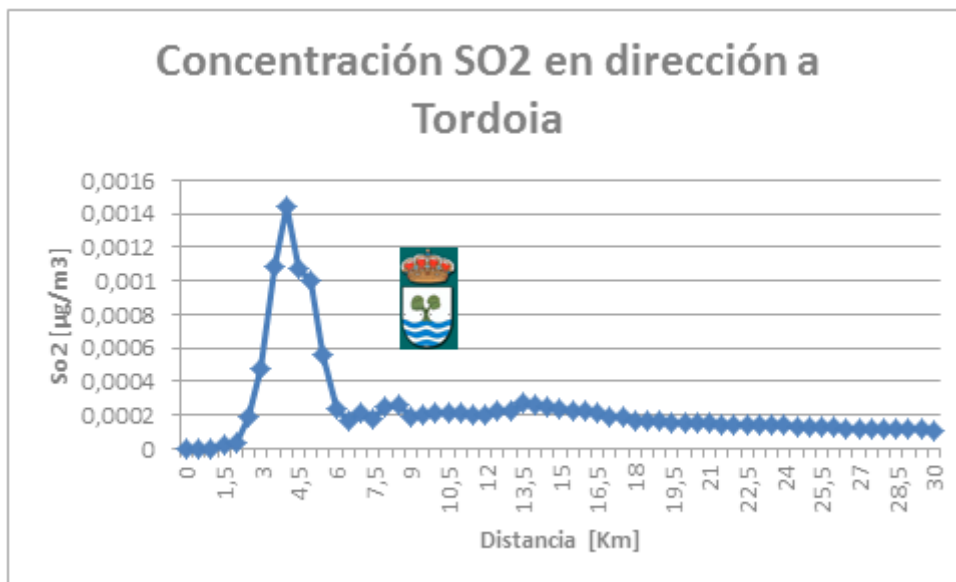


Figura 66: Evolución de SO₂ con la distancia.

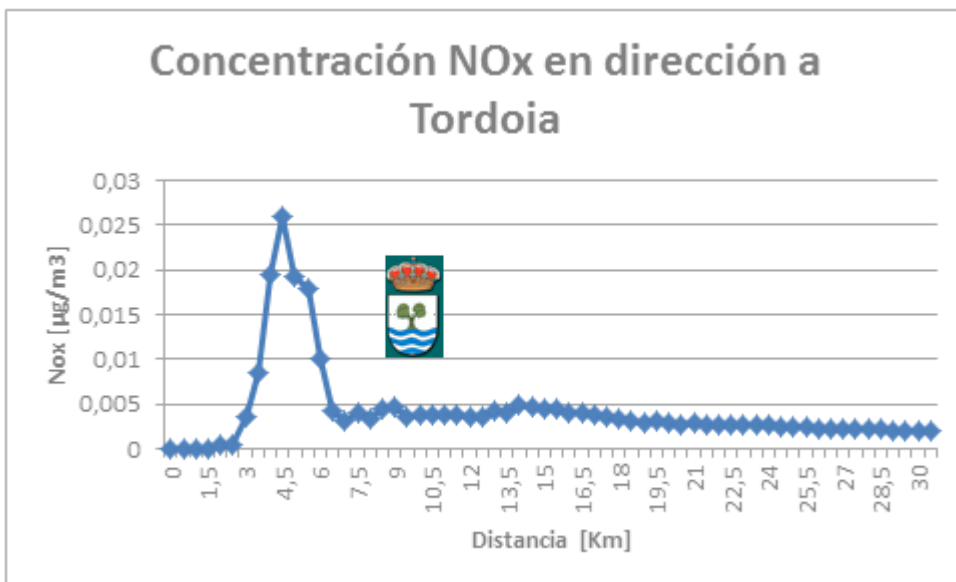


Figura 67: Evolución de NO_x con la distancia.

En relación al comportamiento de las curvas que muestran los resultados del modelo de dispersión (Figuras 66 y 67), señalar que debido a que el modelo ISC3 estima el nivel de concentración de contaminante a nivel del suelo, una característica común a todos los



resultados es que la contaminación en la base de la central resulta nula o cercana a cero en todos los casos (no downwash). Así, el penacho de humo al salir de la chimenea no toca el suelo y por tanto, hasta que no se desarrolla y se produce una dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea, no se registran indicios de contaminación.

Este caso es muy parecido al primero de todos, ya que tiene un orografía bastante parecida, por lo que tiene un pico muy pronunciado de nivel máximo de concentración de contaminantes a nivel del suelo, para posteriormente descender hasta valores próximos a cero.

A continuación podemos analizar el estudio del impacto medio ambiental en la ciudad Tordoia, para ello tomaremos los niveles de contaminación del aire de Santiago de Compostela y los supondremos de Tordoia, (hipótesis conservadora ya que Tordoia tiene un 4,2% de la población de Santiago de Compostela).

Los valores máximos obtenidos debido a las emisiones de la chimenea son:

- Nivel máximo de contaminación de SO_2 $0,0014 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.
- Nivel máximo de contaminación de NO_x $0,026 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.

Puntos de interés:

- Tordoia (9,5 km)
 - Nivel de contaminación de SO_2 $0,000205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.
 - Nivel de contaminación de NO_x $0,0037 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la emisión.

Finalmente calcularemos el incremento del nivel de contaminantes en los puntos de interés antes mencionados para ver el efecto de la planta de biomasa sobre ellos.

- Tordoia (9,5 km)
 - Incremento de 0,0046% de SO_2
 - Incremento de 0,0175% de NO_x

Estos valores son despreciables comparados con los niveles de contaminación de la ciudad, por lo que el impacto medioambiental sobre la población es nulo.



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

BLOQUE V: ESTUDIO ECONÓMICO



En este bloque se mostrará el estudio económico de las principales actividades y de los principales equipos necesarios para el funcionamiento de la planta de biomasa.

1. OBRA CIVIL

La obra civil es la actividad encargada de acondicionar el terreno además de construir los edificios necesarios para cada actividad en la planta.

La obra civil englobará:

1.1. Movimiento de tierras

El movimiento de tierras abarca:

- Nivelación del terreno
- Movimiento de tierras

El coste total del movimiento de tierras para la planta de biomasa asciende a 190.000 €

1.2. Edificación

Los distintos edificios en la planta son:

- Edificios del ciclo Rankine
- Edificios del sistema de tratamiento de aguas
- Balsas

El coste total de la edificación para la planta de biomasa asciende a 1.800.000 €

1.3. Bancadas principales

- Bancadas de los equipos

El coste total de las bancadas para los equipos de la planta de biomasa asciende a 600.000 €

1.4. Urbanización

Las principales tareas de la urbanización son:

- Drenajes
- Canalizaciones
- Cerramientos
- Viales
- Puesta a tierra

El coste total de la urbanización de la planta de biomasa asciende a 250.000 €

La repercusión económica de la parte de obra civil alcanza los 2,84 Millones de euros.



2. INGENIERÍA

La ingeniería es la actividad encargada de diseñar la planta, para ello se necesitaran diferentes tipos de ingenierías:

- | | |
|----------------------------|-----------|
| • Ingeniería básica | 100.000 € |
| • Ingeniería mecánica | 100.000 € |
| • Ingeniería eléctrica | 100.000 € |
| • Ingeniería de control | 100.000 € |
| • Ingeniería de obra civil | 100.000 € |

La repercusión económica de la parte de ingeniería puede alcanzar los 0,5 Millones de euros.



3. EQUIPOS

Dividiremos los equipos en los distintos sistemas que forman la planta, para así poder hacer un mayor desglose de los costes económicos.

3.1. Sistema de tratamiento de biomasa

- | | |
|--|-----------|
| • Silos | 750.000 € |
| • Cribadora | 100.000 € |
| • Astilladora | 200.000 € |
| • Separador de férricos y no férricos | 120.000 € |
| • Sistema de transporte y alimentación a caldera | 50.000 € |

El coste total de los equipos del sistema de tratamiento de biomasa de la planta asciende a 1.220.000 €

3.2. Sistema de refrigeración

- | | |
|--------------------------|-----------|
| • Torre de refrigeración | 300.000 € |
|--------------------------|-----------|

El coste total de los equipos del sistema de refrigeración de la planta de biomasa asciende a 300.000 €

3.3. Sistema de aguas

- | | |
|---------------------------------------|-----------|
| • Sistema de tratamiento de aguas | 500.000 € |
| • Sistema de tratamiento de efluentes | 40.000 € |


El coste total de los equipos del sistema de aguas de la planta de biomasa asciende a 540.000 €

3.4. Ciclo Rankine

- | | |
|---------------|-------------|
| • Turbina | 3.750.000 € |
| • Caldera | 7.750.000 € |
| • Condensador | 500.000 € |
| • Bombas | 20.000 € |

El coste total de los equipos del ciclo Rankine de la planta de biomasa asciende a 12.020.000 €

La repercusión económica de la parte de equipos alcanza los 14 Millones de euros.

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

4. RESUMEN ECONÓMICO

A continuación se mostrará un resumen con todos los costes:

	Coste (€)
Obra civil	2.840.000
Ingeniería	500.000
Equipos	14.080.000
TOTAL	17.420.000

Tabla 46 Resumen económico [17][15][16]

El coste total del estudio económico es aproximadamente 17,5 Millones de euros.



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

BLOQUE VI: CONCLUSIÓN



En este último bloque, plantearemos la conclusión del proyecto básico de una planta de biomasa.

Una vez finalizado todo el estudio de la planta de biomasa podemos decir que la biomasa es un combustible a tener en cuenta como fuente de energía renovable en el futuro, para la generación de electricidad, ya que es una energía que no contamina y no incrementa el efecto invernadero, como hemos podido observar en el bloque IV. Gracias a esta planta de biomasa se conseguiría aumentar la seguridad de la red eléctrica de A Coruña.

Además de sus beneficios medioambientales, también podemos destacar sus beneficios socio-económicos, ya que además de aportar riqueza a la zona, genera puestos de empleo directos e indirectos e incluyendo la conservación de los bosques, permitiendo crecer a las pequeñas poblaciones.

Finalmente podemos concluir que la planta de biomasa en Val do Dubra es viable tanto económicamente, medioambientalmente y socialmente.



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

ANEXOS



1. DETALLE DE LOS CÁLCULOS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

En este anexo se desarrollara el cálculo realizado para el estudio del impacto medioambiental, en el caso de Val do Dubra.

1.1. Velocidad:

$$u(z) = u(z_0) \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^p$$

Velocidad media de un año a 10 m:

$$u(z_0)=5 \text{ m/s}$$

Altura de la chimenea

$$Z=40\text{m}$$

Altura de medida de los datos de velocidad

$$Z_0=10\text{m}$$

El parámetro adimensional p se determina en función de las condiciones de estabilidad y atendiendo a la zona en que nos encontramos.

Estabilidad según Pasquill	Medio rural	Medio urbano
A	0.08	0.17
B	0.09	0.17
C	0.11	0.20
D	0.16	0.27
E	0.32	0.38
F	0.54	0.61

Tabla 37: Determinación del parámetro p

Consideraremos una estabilidad según Pasquill tipo E (atmósfera ligeramente estable) y una zona rural, por lo que, el parámetro obtiene el siguiente valor:

$$p = 0.32$$

La velocidad a la altura de la chimenea después de interpolar (se explicará más adelante):

$$u(z)=7,8 \text{ m/s}$$

1.2. Dispersión lateral y vertical de la columna de gases


$$\sigma_y = 465.11628 \cdot x \cdot \tan(TH)$$

$$TH = 0.017453293(c - \ln(x))$$

Donde:

x : Distancia al punto donde se calcula la dispersión. [km]

c : Parámetro adimensional. []

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

d:Parámetro adimensional. []

El parámetro adimensional c y d se determina en función de las condiciones de estabilidad de la zona en que nos encontramos.

Estabilidad según Pasquill	c	d
A	24.167	2.5334
B	18.333	1.8096
C	12.5	1.0857
D	8.333	0.72382
E	6.25	0.54287
F	4.1667	0.36191

Tabla 38: Determinación del parámetro c y d

Siguiendo con la suposición conservadora de atmósfera ligeramente estable obtenemos:


$$C=6.25$$

$$D=0.54287$$

Con estos dos valores podemos calcular la dispersión lateral a lo largo de x:

x (km)	$\sigma_y(l)$
0,5	27,0160336
1	50,9385186
1,5	73,6964817
2	95,6988337
2,5	117,139623
3	138,133079
.....
26	947,765518
26,5	963,753636
27	979,699984
27,5	995,605337
28	1011,47044
28,5	1027,29602
29	1043,08276
29,5	1058,83134
30	1074,5424

Tabla 47: Valores de σ_y en función de x

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

La dispersión vertical la obtendremos con una ecuación parecida:

$$\sigma_z = a \cdot x^b$$

Los parámetros a y b están tabulados en el modelo de PasquillGifford y son los siguientes en función de x:

Estabilidad según Pasquill	x [km]	a	b
E	<0.10	24.260	0.83660
	0.10-0.30	23.331	0.81956
	0.31-1.00	21.628	0.75660
	1.01-2.00	21.628	0.63077
	2.01-4.00	22.534	0.57154
	4.01-10.00	24.703	0.50527
	10.01-20.00	26.970	0.46713
	20.01-40.00	35.420	0.37615
	>40.00	47.618	0.29592

Tabla 48: Valores de a y b en función de x

Con los valores de a y b podemos calcular la dispersión vertical:

x (km)	$\sigma_z()$
0,5	12,8
1	21,6
1,5	27,9
2	33,4
2,5	38,0
3	42,2
.....
26	120,6
26,5	121,5
27	122,3
27,5	123,2
28	124,0
28,5	124,8
29	125,6
29,5	126,5
30	127,3

Tabla 49: Valores de σ_z en función de x



1.3. Altura efectiva

El modelo Gaussiano ISC3 se basa en la hipótesis de que el penacho de humo se estabiliza cuando alcanza la denominada altura efectiva, h_e . Esta altura efectiva es la suma de la altura geométrica (corregida o no) de la chimenea más un incremento gracias al cual consigue la estabilidad.

$$h_e = h_s + \Delta h$$

Primero deberemos saber si es necesario corregir la altura de chimenea debido al efecto Downwash anteriormente mencionado.

Habrà efecto Downwash si la velocidad de salida de los humos por la chimenea, V_s es inferior a 1.5 veces la velocidad del viento circundante.

Se produce Downwash	Altura de chimenea corregida
$v_s < 1.5 \cdot u \rightarrow \text{Sí}$	$h_s' = h_s + 2 \cdot d_s \cdot \left[\frac{v_s}{u} - 1.5 \right]$
$v_s > 1.5 \cdot u \rightarrow \text{No}$	$h_s' = h_s$

Tabla 50: Efecto Downwash

Tenemos una velocidad de salida de 10 m/s y una velocidad del viento circulante 4.1 m/s

$$v_s > 1.5 \cdot u$$

$$12 \text{ m/s} > 11.7 \text{ m/s}$$

$$h_s' = h_s$$

Obtenida ya la altura corregida solo nos falta conocer Δh que se obtendrá mediante factores meteorológicos:

Condiciones atmosféricas estables	
Velocidad crítica de distinción $u_c = 0.2746 F^{1/4} S^{1/8}$	
Con viento	Sin viento
$h_e = h_s' + 2.6 \left(\frac{F}{uS} \right)^{1/3}$	$h_e = h_s' + 4 F^{1/4} S^{-3/8}$

Tabla 51: Altura efectiva



Donde:

S: Parámetro de estabilidad: $s = \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta z} \right) \cdot \frac{g}{T}$

T: Temperatura del ambiente circundante a la chimenea.

$\frac{\Delta\theta}{\Delta z}$: Gradiente potencial de temperatura.

F: Parámetro de flotación de la columna de humo: $F = \frac{g \cdot v_s \cdot d_s^2 \cdot (T_s - T)}{4 \cdot T_s}$

d_s : Diámetro de la chimenea de salida de los gases.

T_s : Temperatura de salida de los gases de escape.

La altura efectiva final se obtendrá mediante la iteración.

$$h_e = h_s' + 2.6 \left(\frac{F}{u_s} \right)^{1/3}$$

Iteraremos mediante programas de cálculo la altura y la velocidad hasta obtener un valor con una tolerancia inferior a 0,1.

Empezamos con los siguientes valores:

$$h_s = 40 \text{ m}$$

$$h_w = 10 \text{ m}$$

$$u_s = 12 \text{ m/s}$$

$$u = 5,47 \text{ m/s}$$

$$u(w) = 3,4 \text{ m/s}$$

$$s = \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta z} \right) \cdot \frac{g}{T} = 2,566 \cdot 10^{-4} \text{ 1/s}^2$$

$$F = \frac{g \cdot v_s \cdot d_s^2 \cdot (T_s - T)}{4 \cdot T_s} = 97,932 \text{ m}^4/\text{s}^3$$



Primera iteración

$$h_{e1} = h_s + 2.6 \left(\frac{F}{u_s} \right)^{1/3} = 147,037 \text{ m}$$

$$u(we) = u(w) \cdot \left(\frac{h_{e1}}{h_w} \right)^p = 8,036 \text{ m/s}$$

Tolerancia

$$\frac{u(we) - u(w)}{u(we)} = 0.576 \text{ No cumple la tolerancia}$$

No cumplimos la tolerancia, debemos seguir iterando.

Siguiente iteración

$$h_{e2} = h_s + 2.6 \left(\frac{F}{u(we)S} \right)^{1/3} = 134 \text{ m}$$

$$u(we2) = u(w) \cdot \left(\frac{h_{e2}}{h_w} \right)^p = 7,8 \text{ m/s}$$

Tolerancia

$$\frac{u(we2) - u(we)}{u(we2)} = -0.03 \text{ Tolerancia inferior al 5\%}$$

Cumplimos la tolerancia, ahora debemos asegurarnos de que la velocidad obtenida sea mayor que la u_c para asegurarnos la suposición de atmósfera estable con viento.

$$u(we2) = u(z) = 7,8 \text{ m/s}$$

$$u_c = 0,2746 \cdot \left(F^{1/4} \right) \cdot \left(S^{1/8} \right) = 0,307 \text{ m/s}$$

$$u_c < u(z)$$

Finalmente la altura efectiva será:

$$h_e = 134 \text{ m}$$

1.4. Término de distribución vertical del contaminante

El modelo ISC3 simplifica este efecto, por lo que, considera la dispersión sin restricciones en la dirección vertical, quedando el término V, de la siguiente manera:

$$V = \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{Z_r - h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{Z_r + h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$



x(km)	V
0,5	2,52E-06
1	2,87E-3
1,5	9,89E-05
2	1,52E-3
2,5	0,35
3	0,99
....
26	1,08
26,5	1,09
27	1,06
27,5	1,06
28	0,83
28,5	0,72
29	0,61
29,5	0,70
30	0,75

Tabla 52: Valores de V en función de x

1.5. Término de agotamiento o eliminación del contaminante por reacción química u otros procesos físicos

D=1



1.6. Resolución del modelo ISC3

$$Q = u_s \cdot \frac{\pi d_s^2}{4} = 84,823 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_x = \frac{m_x}{2\pi \cdot u(z) \cdot \sigma_z \cdot \sigma_y} \cdot \left[\exp\left(-0.5 \frac{z_r - h_e}{\sigma_z}\right) + \exp\left(-0.5 \frac{z_r + h_e}{\sigma_z}\right) \right]$$

x(km)	$C_{SO_2} \left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	$C_{NO_x} \left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$
0,5	9,742E-08	1,7551E-06
1	3,4822E-05	0,00062732
1,5	6,4248E-07	1,1575E-05
2	6,3727E-06	0,00011481
2,5	0,00105468	0,01900036
3	0,00228132	0,04109866
...
26	0,0001268	0,00228435
26,5	0,000125	0,0022519
27	0,00011884	0,00214092
27,5	0,00011643	0,00209755
28	8,86E-05	0,00159615
28,5	7,5403E-05	0,00135841
29	6,2427E-05	0,00112464
29,5	7,0013E-05	0,0012613
30	7,3737E-05	0,0013284

Tabla 53: Valores de concentración en función de x



2. LISTA DE TABLAS

Tabla 2: Consumo de las de las tres principales fuentes de energía 2010

Tabla 2: Consumo desglosado de las diferentes energías entre 2009 y 2010

Tabla 3: Grado de autoabastecimiento energético

Tabla 4: Cantidad de Eucalipto (ha)

Tabla 5: Fijación de CO₂

Tabla 6: Consumo de agua

Tabla 7: Rendimiento Forestal

Tabla 8: Características Eucalipto Globulus

Tabla 9: Consumo de energía primaria en el escenario de eficiencia energética adicional

Tabla 10: Balance económico de efectos directos

Tabla 11: Otros beneficios

Tabla 12: Creación de riqueza 2005-2020

Tabla 13: Exportación Neta 2006-2020

Tabla 14: Emisiones evitadas 2011-2020

Tabla 15: Análisis elemental

Tabla 16: Interpolación entre 480°C y 520°C

Tabla 17: Interpolación entre 2.899,3 kJ/kg y 2.992,7 kJ/kg

Tabla 18: Interpolación entre 766,55 kJ/kg y 945,1 kJ/kg

Tabla 19: Interpolación entre 767,84 kJ/kg y 945,9, kJ/kg

Tabla 20: Parámetros ciclo Rankine

Tabla 21: Parámetros caldera

Tabla 22: Parámetros globales del ciclo

Tabla 23: Parámetros de la planta



Tabla 24: Resumen parámetros de la planta

Tabla 25: Resumen puntos del diagrama T-S

Tabla 26: Resumen puntos del ciclo Rankine

Tabla 27: Resumen puntos del sistema de biomasa

Tabla 28: Punto del sistema de refrigeración

Tabla 29: Resumen puntos del sistema de aguas

Tabla 30: Sistema de aguas

Tabla 31: Comparación de rendimientos

Tabla 32: Principales resultados del análisis cualitativo

Tabla 33: Efecto de la variación del viento

Tabla 34: Condiciones meteorológicas que definen las diferentes categorías de estabilidad según Pasquill y Gifford

Tabla 35: Resumen de los diferentes aspectos que afectan a la dispersión

Tabla 36: Parámetros de entrada en el modelo ISC3

Tabla 37: Determinación del parámetro p

Tabla 38: Determinación del parámetro c y d

Tabla 39: Parámetros a y b

Tabla 40: Altura de la chimenea

Tabla 41: Altura efectiva

Tabla 42: Emisiones procedentes de Emission Factor

Tabla 43: Valores límite SO₂

Tabla 44: Valores límite NO_x

Tabla 45: Ciudades próximas a la planta

Tabla 46: Resumen económico

Tabla 47: Valores de σ_y en función de x

Tabla 48: Valores de a y b en función de x




Tabla 49: Valores de σ_z en función de x

Tabla 50: Efecto Downwash

Tabla 51: Altura efectiva

Tabla 52: Valores de V en función de x

Tabla 53: Valores de concentración en función de x

	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

3. LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Millones de toneladas equivalentes de petróleo

Figura 2: Porcentaje de Eucalipto Globulus en el mundo

Figura 3: Consumo final bruto de energía primaria en España

Figura 4: Consumo de energía primaria en España (Energías Renovables)

Figura 5: Producción Eléctrica

Figura 6: Producción Eléctrica mediante energías renovables

Figura 7: Escenario del precio del barril de crudo de petróleo Brent

Figura 8: Escenario del precio del Gas Natural importado en España

Figura 9: Contribución total de las energías renovables al PIB de España

Figura 10: Balance exportación-importación 2006-2020

Figura 11: Hectáreas de Eucalipto entre superficie total de cada comunidad

Figura 12: Provincias de la Comunidad Autónoma de Galicia

Figura 13: Hectáreas de Eucalipto entre superficie total de cada provincia de la Comunidad Autónoma de Galicia

Figura 14: Localización de Termino municipal de Valle del Dubra en la comunidad autónoma de Galicia.

Figura 15: Localización de Termino municipal de Valle del Dubra en la provincia de A Coruña.

Figura 16: Ubicación exacta de la planta de biomasa en el término municipal Valle del dubra.

Figura 17: Parcela donde se situará la planta.

Figura 18: Diferentes usos de las zonas próximas a la planta.

Figura 19: Ríos pertenecientes a Aguas de Galicia, próximos a la planta de biomasa.

Figura 20: ZEPA y LIC próximos a la planta de biomasa.

Figura 21: Poblaciones más importantes próximas a la planta de biomasa

Figura 22: Mapa de carreteras proximidades de la planta de biomasa

Figura 23: Entrada a la planta de biomasa


	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Figura 24: Diagrama de bloques de los distintos sistemas de la planta

Figura 25: Sistema de tratamiento de biomasa

Figura 26: Sistema de captación

Figura 27: Sistema de vertido

Figura 28: Sistema de refrigeración

Figura 29: Ciclo Rankine con una extracción

Figura 30: Balance de energía en el condensador

Figura 31: Diagrama T-S

Figura 32: Diagrama completo de toda la planta

Figura 33: Diagrama del balance de aguas

Figura 34: Caudal del río Dubra

Figura 35: Comparación del caudal mínimo del río Dubra y el caudal necesario

Figura 36: Comparación de hectáreas necesarias con hectáreas disponibles

Figura 37: Gasificación y Cámara torsional

Figura 38: Combustión torsional

Figura 39: Capas de la atmósfera

Figura 40: Ciclo de los contaminantes atmosféricos

Figura 41: Fases de un penacho

Figura 42: Influencia de los contaminantes en las distintas zonas de una colina

Figura 43: Altura de mezcla atmosférica

Figura 44: Clasificación de los diferentes movimientos de los penachos

Figura 45: Concentración de contaminantes en función de la posición, según tenga el penacho desarrollo estable, inestable o neutro

Figura 46: Modelo Gaussiano

Figura 47: Metodología ISC3

Figura 48: Nivel de NOx en Santiago de Compostela


	PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España
	Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

Figura 49: Nivel de SO₂ en Santiago de Compostela

Figura 50: Nivel de NO_x en A Coruña

Figura 51: Nivel de SO₂ en A Coruña

Figura 52: Ubicación de Val do Dubra respecto a la planta de biomasa. (Distancia 6.6 km)

Figura 53: Orografía entre la Planta y Val do Dubra

Figura 54: Evolución de SO₂ con la distancia.

Figura 55: Evolución de NO_x con la distancia

Figura 56: Ubicación de Santa Comba respecto a la planta de biomasa. (Distancia 11.76 km)

Figura 57: Orografía entre la Planta y Santa Comba.

Figura 58: Evolución de SO₂ con la distancia.

Figura 59: Evolución de NO_x con la distancia

Figura 60: Ubicación de Coristanco respecto a la planta de biomasa. (Distancia 14.45 km)

Figura 61: Orografía entre la Planta y Coristanco.

Figura 62: Evolución de SO₂ con la distancia.

Figura 63: Evolución de NO_x con la distancia.

Figura 64: Ubicación de Tordia respecto a la planta de biomasa. (Distancia 9.5 km)

Figura 65: Orografía entre la Planta y Tordoa.

Figura 66: Evolución de SO₂ con la distancia.

Figura 67: Evolución de NO_x con la distancia.



4. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de industria, turismo y comercio
- [2] Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente
- [3] Red Natura 2000 LIC + ZEPA
- [4] Visor SIGPAC
- [5] Visor SIGA
- [6] Google Map
- [7] Augas de Galicia
- [8] Ayuntamiento, Concello val do Dubra
- [9] Plan de Energías Renovables 2011-2020 (PER)
- [10] Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE)
- [11] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA)
- [12] Libro: Los biocombustibles; Autor Marcos Martin
- [13] Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires
- [14] Asociación eólica de Galicia (EGA)
- [15] Calderas Continental
- [16] Dresser-Rand
- [17] Cofem
- [18] Git Forestry Consulting
- [19] Google Earth
- [20] Apuntes Procesos Térmicos Industriales; Universidad Carlos III de Madrid
- [21] Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA)
- [22] Xunta de Galicia Conselleria de medio ambiente.
- [23] Libros sobre Ingeniería Energética; Autor Pedro Fernández Díez
- [24] Grupo empresarial ENCE



PFC: Proyecto Básico de una planta de biomasa en España

Autor: Juan Antonio Pozas Ortiz

[25] BIOMASS COMBUSTION FOR POWER GENERATION

[26] Emission factor

[27] Boletín Oficial del Estado